

# ***ESTUDIO DE LA ADHESIÓN EN LA RUGOSIDAD DEL ALUMINIO.***



***UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID***

***DEPARTAMENTO DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE  
MATERIALES E INGENIERÍA QUÍMICA***

***CURSO ACADÉMICO 2012- 2013***

**Autor:** Daniel Torrejón Magdaleno

**Tutor:** Miguel Ángel Martínez Casanova

***INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA***





## **RESUMEN**

Este proyecto consiste en un estudio de cómo la variación de rugosidades en la superficie de un material metálico, en este caso el aluminio, puede producir una mejora en su adhesión. Para ello se estudiaron en el laboratorio los diferentes parámetros asociados a la rugosidad tales como longitud de perfil y superficie de perfil, longitud de ondulación y superficie de ondulación, longitud de rugosidad y superficie de rugosidad, el valor RA y la curva de Abbott-Firestone.

Para realizar los ensayos ha sido necesario realizar una preparación previa de las probetas y sufrideras. En primer lugar se ha preparado su superficie, lijándolas con tres tipos de lijas distintas, posteriormente se han limpiado las distintas superficies con etil-metil-cetona para poder tener una capa superficial limpia de sustancias que podrían transformar de manera errónea los resultados, como la grasa de la piel humana e impurezas del ambiente. A continuación se han fijado a sufrideras mediante adhesivo, para posteriormente poder ser sometidas a un esfuerzo de tracción para poder así conocer la tensión de tracción que es capaz de soportar la unión.

Todos los pasos anteriormente nombrados han sido repetidos un mínimo de determinado de veces con el objetivo de ofrecer unos resultados más ajustado y verosímiles de tal manera que se ajusten más a la realidad.

Con todo ellos se han obtenido resultados en los cuales se prueba que la rugosidad tiene un efecto determinante en relación a la fuerza de adhesión que puede ofrecer un adhesivo sobre un substrato.



## **ABSTRACT**

The project is a study of how the variation of roughness on the surface of a metallic material, in this case aluminum, can produce an improvement in adhesion. We studied in the laboratory the different parameters associated with roughness such as the profile length and profile surface, waviness length and waviness surface, roughness length and roughness surface, RA value and the Abbott-Firestone curve.

To carry out the test it was necessary to perform a preparation of the specimens and dollies. First we have prepared the surface by sanding it with three different types of sand paper, after that, the different surfaces have been cleaned with methyl ethyl acetone so we can have a superficial layer free of substances which could drive us to mistakes and wrong results, as for example human skin fat or impurities from the environment. Then dollies have been glued to be submitted to a traction stress so we can know the tension that the union can support.

All previously mentioned steps were repeated a minimum of times in order to provide tighter and more credible results so they can be closer to reality.

With all this we have obtained results which prove that the roughness has a determining effect in relation to the adhesion force that can provide an adhesive over a substrate.



## ÍNDICE

<b>1. Antecedentes .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Concepto de adhesivo.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2. Situación del campo investigado .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Parámetros de estudio .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. Introducción .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2. Superficie .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.1. Características de las superficies .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.2. Textura de las superficies .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3. Rugosidad y curva de Abbott-Firestone .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3.1. Parámetros de evaluación de la curva de Abbott-Firestone.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2. Normativa UNE-EN-ISO 4287 con respecto a la rugosidad .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4. Adhesión .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.1. Definición.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.2. Teorías sobre la adhesión. Modelos de adhesión.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.3. Mecanismos de fallo de las uniones adhesivas .....</b>	<b>28</b>
<b>3. Parte experimental .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. Preparación de probetas .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2. Cálculo de la rugosidad.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3. Cálculo de la adhesión .....</b>	<b>36</b>
<b>4. Resultados .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1. Resultados obtenidos del rugosímetro.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1.1. Aluminio con lija grano 1000 (PE.1000) .....</b>	<b>39</b>



4.1.2. Aluminio con lija de lana de vidrio (PE.LV).....	43
4.1.3. Aluminio con lija de grano 2 (PE.2) .....	47
5. Valores de adhesión.....	52
5.1. Eliminación de datos .....	53
6. Errores .....	61
6.1. Errores de medidas realizadas con el rugosímetro .....	63
6.2. Errores de ensayos de tracción .....	64
7. Resultados .....	65
8. Conclusiones .....	77
9. Líneas de trabajo futuras .....	79
10. Bibliografía y referencias .....	80
10.1. Bibliografía.....	80
10.2. Referencias.....	81



## **1. Antecedentes.**

Los adhesivos se conocen desde tiempos inmemoriales y han sido empleados extensamente a lo largo de la historia hasta la actualidad. Existen ejemplos naturales de adhesión, como es el caso de las telas de araña, de los panales de abejas o de los nidos de pájaros. Se han hallado vestigios del uso de la sangre animal como adhesivo durante la Prehistoria. Los babilonios empleaban cementos bituminosos hacia el 4000 A.C, mientras que los egipcios preparaban adhesivos mediante la cocción de huesos de animales para la adhesión de láminas de madera hacia el 1800 A.C. La ciencia y el estudio de los adhesivos desaparecen por completo durante un largo periodo de tiempo tras la caída del imperio romano en occidente, dando paso a una época de oscurantismo en este campo.

Fue a partir del siglo XVIII donde comienza de nuevo el estudio y aplicación de los materiales adhesivos como medio de unión, siendo los comienzos del siglo XX, gracias a la revolución industrial, la época donde se desarrolló la ciencia de los polímeros y con ello nacieron los adhesivos sintetizados en el laboratorio permitiendo crear nuevos materiales y nuevos diseños utilizados en una amplia gama de industrias.

Los adhesivos del futuro estarán diseñados para adherirse sobre cualquier sustrato sin necesidad de preparación superficial, alcanzarán unas extraordinarias propiedades mecánicas de resistencia y elongación, soportarán cualquier tipo de ambiente y temperatura, su curado será instantáneo y se podrán despegar y volver a pegar en el momento que nosotros queramos, gracias a los avances científicos y al esfuerzo de numerosos investigadores y empresas, quizás este futuro no sea muy lejano.

### **1.1. Concepto de adhesivo**

Se puede definir adhesivo como aquella sustancia que aplicada entre las superficies de dos materiales permite una unión resistente a la separación. Denominamos sustratos o adherentes a los materiales que pretendemos unir por mediación del adhesivo. El conjunto de interacciones físicas y químicas que tienen lugar en la interfase adhesivo/adherente recibe el nombre de adhesión.

### **1.2. Situación del campo investigado**

El estado en el que se encuentra actualmente el mercado de adhesivos y selladores industriales queda patente en el hecho de que tan sólo diez empresas aglutinan el 64,8% de dicho mercado en España. Esta es la conclusión más significativa que se extrae del informe “Adhesivo y sellador”, elaborado por la consultora DBK en septiembre de este mismo año.

Desde hace tiempo la tendencia de estas empresas ha sido la fusión, si bien otras compañías han desaparecido, directamente, del mercado.

En 2010 operaban en el sector aproximadamente 130 fabricantes, y desde entonces se ha ido produciendo un ligero descenso hasta la actualidad. El volumen de empleo de estas firmas rondaba los 4.300 trabajadores.

Ese mismo año la gran tendencia a la concentración quedó reflejada en el hecho de que las cinco principales compañías del sector (Henkel, Quilosa, Ceys, ICI España y Forbo Adhesives Spain) representaban el 49,5% del mercado. La cifra asciende a casi el 65% cuando hablamos de las diez empresas punteras del país.

En el mismo ejercicio el valor de las exportaciones totales experimentó una importante ralentización en su ritmo de crecimiento, pasando de una tasa de variación del 11,5% en 2009 a un 3,2% en el siguiente ejercicio. Los principales destinos para la exportación española, que suponen la mitad del valor total, son Portugal, Alemania y Francia. En lo que respecta a las importaciones, el montante aumentó en un 12,4%, destacando el gran incremento de las compras con origen en algunos de los principales países de la Unión Europea, como Portugal, Países Bajos, Francia, Alemania o Bélgica.



El valor de la producción se mantuvo estancado durante 2010 y, a pesar del comportamiento positivo de la demanda nacional, se situó sólo en el 1,4% alcanzando los 496 millones de euros.

Según la consultora DBK, el futuro del sector a corto plazo es optimista. El mercado de adhesivos y selladores mantendrá en el periodo 2011-2012 un crecimiento que se sostendrá en torno al 4-5% anual, muy similar al de años precedentes, aunque no se descarta que se produzca una pequeña desaceleración. Si se cumplen todas las previsiones, esta evolución permitirá lograr una cifra de negocio que superará los 640 millones de euros en 2013. A corto y medio plazo, el segmento de los selladores continuará mostrando una evolución ligeramente más favorable que el de los adhesivos.

Por otro lado, el ámbito de la construcción ha experimentado una notable ralentización, lo cual unido al deterioro de la evolución de algunas de las principales variables macroeconómicas pueden explicar la más que previsible moderación del ritmo de progresión del mercado. Sin embargo, esta desaceleración se verá parcialmente contrarrestada por la recuperación de algunos de los grandes clientes del sector.

Los indicadores referidos a los primeros meses de 2012 muestran una clara reactivación de la actividad exportadora, previéndose un aumento para todo el año que se sitúa en torno al 6%. Por otro lado, el valor de las importaciones podría alcanzar el 10%.

Analizando todas estas variables, los expertos estiman que la concentración sectorial continuará durante los próximos años. Este hecho supondrá nuevas operaciones de compra y fusión entre entidades, no sólo en el ámbito nacional sino también en el internacional.



## **2. Parámetros de estudio**

### **2.1. Introducción**

Es evidente que hoy en día no sólo basta con la concreción de las medidas de una pieza, sino que se necesita estudiar y normalizar los estados superficiales de la pieza mecanizada, sobre todo para poder establecer los ajustes y las tolerancias de la propia pieza, de ahí que surja la micro geometría que estudia los defectos de la superficie, rugosidades, ondulaciones, etc. producidas en los procesos de mecanizado de las piezas, las cuales perjudican la precisión y exactitud de las medidas, disminuye los ajustes y producen vibraciones en las máquinas.

Al principio se tenía una mala clasificación dado que se utilizaban palabras como basta, fina, alisada, para determinar un estado superficial. En 1940 se inició en E.E.U.U. un método que puede permitir relacionar los distintos grados de acabado con las necesidades del montaje y servicio que deben prestar las piezas en base a establecer una serie de requisitos, es decir, hay unas normas superficiales. Y obliga a que una vez determinado el acabado superficial se debe especificar el proceso de mecanizado concreto.

### **2.2. Superficie**

Una superficie es la delimitación o término de un cuerpo, que lo separa y distingue de lo que no es él, o bien una magnitud que expresa la extensión de un cuerpo en dos dimensiones, largo y ancho. Su unidad en el Sistema Internacional es el metro cuadrado.

#### **2.2.1. Características de las superficies**

Una vista microscópica de la superficie de una pieza revela sus irregularidades e imperfecciones. Los rasgos de una superficie común se ilustran en la sección transversal magnificada de la superficie de una pieza metálica. Aunque aquí el análisis se concentra en las superficies metálicas, los comentarios vertidos aquí se aplican a las cerámicas y polímeros, con



modificaciones debidas a las diferencias en la estructura de estos materiales. El cuerpo de la pieza, conocida como sustrato, tiene una estructura granular que depende del procesamiento previo del metal; por ejemplo, la estructura del sustrato del metal se ve afectada por su composición química, el proceso de fundición que se usó originalmente para el metal, y cualesquiera operaciones de deformación y tratamientos térmicos llevados a cabo sobre el material de fundición.

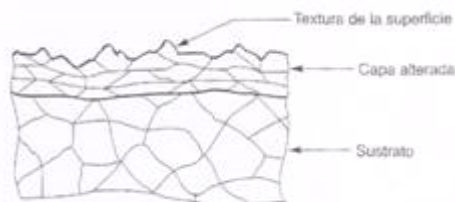
El exterior de la pieza es una superficie cuya topografía es todo menos recta y tersa.

En la sección transversal magnificada, la superficie tiene rugosidad, ondulaciones y defectos. Aunque aquí no se observan, también tiene un patrón o dirección que resulta del proceso mecánico que la produjo. Todos estos rasgos geométricos quedan incluidos en el término textura de la superficie.

Justo por debajo de la superficie se encuentra una capa de metal cuya estructura difiere de la del sustrato. Se denomina capa alterada, y es una manifestación de las acciones que se mencionaron al hablar de la superficie, durante la creación de ésta y etapas posteriores. Los procesos de manufactura involucran energía, por lo general en cantidades importantes, que opera sobre la pieza, contra su superficie. La capa alterada puede resultar del endurecimiento por trabajo (energía mecánica), calor (energía térmica), tratamiento químico, o incluso energía eléctrica. El metal de esta capa resulta afectado por la aplicación de energía, y su micro estructura se altera en consecuencia. Esta capa alterada cae dentro del alcance de la integridad de la superficie, que tiene que ver con la definición, la especificación y el control de las capas de la superficie de un material (metales, los más comunes), en la manufactura y el desempeño posterior en el uso. El alcance de la integridad de la superficie por lo general se interpreta para incluir la textura de la superficie, así como la capa alterada ubicada bajo ella.

Además, la mayoría de las superficies metálicas están cubiertas por una capa de óxido, si se da el tiempo suficiente para que se forme después del procesamiento. El aluminio forma en su superficie una capa delgada, densa y dbdfura de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (que sirve para proteger al sustrato de la corrosión), y el fierro forma óxidos de varias composiciones químicas sobre su superficie (el

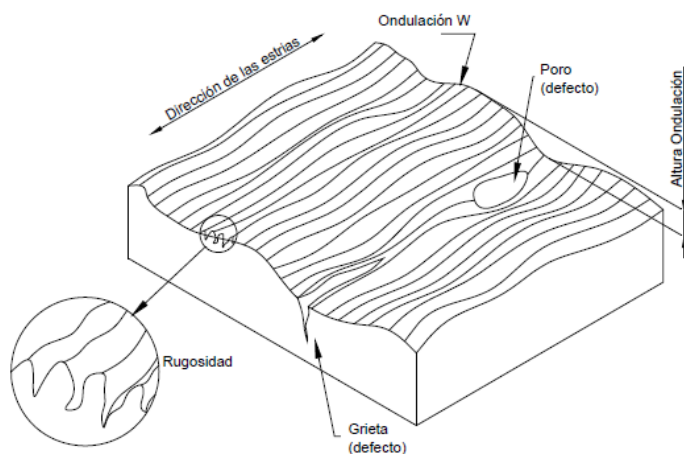
óxido, que virtualmente no da ninguna protección). También es probable que en la superficie de la pieza haya humedad, mugre, aceite, gases adsorbidos, y otros contaminantes.



*Figura 1. Sección transversal de una superficie común*

### **2.2.2. Textura de las superficies**

La textura de la superficie consiste en las desviaciones repetitivas o aleatorias de la superficie nominal de un objeto, la definen cuatro características: rugosidad, ondulación, orientación y defectos o fallas, como se observa en la figura:



*Figura 2. Rasgos de la textura de una superficie*


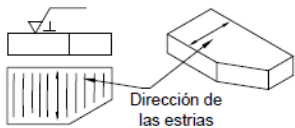
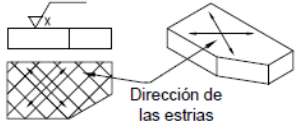
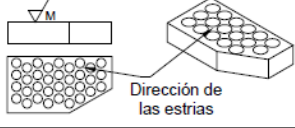
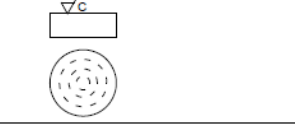
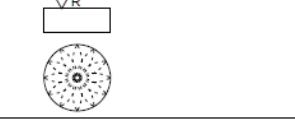

La rugosidad se refiere a las desviaciones pequeñas, espaciadas finamente, de la superficie nominal y que están determinadas por las características del material y el proceso que formó la superficie.

La ondulación se define como las desviaciones de espaciamiento mucho mayor; ocurren debido a la deflexión del trabajo, vibraciones, tratamiento térmico, y factores similares. La rugosidad está sobreimpuesta a la ondulación.

La orientación es la dirección predominante o patrón de la textura de la superficie. Está determinada por el método de manufactura utilizado para crear la superficie, por lo general a partir de la acción de una herramienta de corte.

En la tabla 1 se ilustran la mayoría de las orientaciones posibles que puede haber en una superficie, junto con el símbolo que utiliza el diseñador para especificarlas.

*Tabla 1. Orientaciones posibles de una superficie*

Símbolo gráfico	Interpretación de la dirección de las estrías de mecanizado	Ejemplo de aplicación
=	Paralelas al plano de la vista en la que se aplica el símbolo.	
⊥	Perpendiculares al plano de la vista en la que se aplica el símbolo.	
X	Cruzadas en dos direcciones oblicuas con respecto al plano de la vista en la que se aplica el símbolo.	
M	Multidireccionales.	
C	Aproximadamente circulares, alrededor del centro de la cara en la que se aplica el símbolo.	
R	Aproximadamente radiales con respecto al centro de la cara en la que se aplica el símbolo.	
P	Ni direccionales ni protuberantes.	

Los defectos son irregularidades que ocurren en forma ocasional en la superficie; incluyen: grietas, ralladuras, inclusiones y otros defectos similares. Aunque algunos de los defectos se relacionan con la textura de la superficie también afectan su integridad.

### **2.3. Rugosidad y curva Abbott-Firestone**

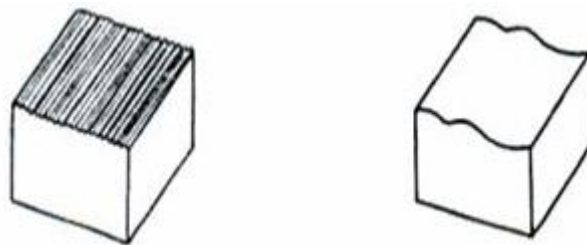
En los materiales, la textura de la superficie consiste en las desviaciones repetitivas y/o aleatorias con respecto a la superficie nominal. Se define por cuatro características: rugosidad, ondulación, orientación y defectos.

Esta irregularidad superficial influye en numerosos procesos, como la capacidad de adhesión del material o la capacidad de absorción de suciedad del ambiente, por ejemplo.

La ondulación se puede ocasionar por la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etc.

La rugosidad se provoca por el elemento utilizado para producir el maquinado, por ejemplo la herramienta de corte o la piedra de rectificado. Es decir que esta irregularidad se originan durante el proceso de fabricación.

La diferencia visual entre ondulación y rugosidad se puede observar ver en la figura 3.



*Figura 3. Diferencia entre rugosidad y ondulación*

Se tiene que tener en cuenta que este tipo de imperfecciones o irregularidades no son incompatibles y generalmente se presentan simultáneamente como se puede observar en la figura 4.



*Figura 4. Rugosidad y ondulación simultáneamente*

### **2.3.1. Parámetros de evaluación de la curva de Abbott-Firestone**

Por convenio, todos los parámetros de rugosidad en 2D se definen con la letra R seguida de caracteres adicionales en el subíndice. El subíndice identifica la fórmula que se utilizó, y la R significa que la fórmula se aplicó a un perfil de rugosidad en 2D. Diferentes letras mayúsculas implica que la fórmula se aplicó a un perfil diferente.

Cada uno de los parámetros de rugosidad se calcula utilizando una fórmula para describir la superficie. En la tabla 2 vienen las fórmulas de los más comunes:

Tabla 2. Parámetros de rugosidad

Parámetro	Descripción	Fórmula
$R_a$ , $I_{bis}$ , $I_{ym}$	media aritmética de los valores absolutos	$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_i $
$R_q$ , $R_{RMS}$	raíz cuadrada	$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$
$R_v$	profundidad máxima de valle	$R_v = R \min_i y_i$
$R_p$	máxima altura	$R_p = \max_i y_i$
$R_t$	Altura máxima del perfil	$R_t = R_p - R_v$
$R_{sk}$	asimetría	$R_{sk} = \frac{1}{n R_q^3} \sum_{i=1}^n y_i^3$
$R_{ku}$	curtosis	$R_{ku} = \frac{1}{n R_q^4} \sum_{i=1}^n y_i^4$
$R_{zDIN}$ , $R_{zASME}$	distancia media entre el pico más alto y más bajo en el valle de duración de cada muestreo, ASME Y14.36M - 1996 la superficie de textura Símbolos	$R_{zDIN} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s R_{ti}$ , Donde $s$ es el número de longitudes de muestra, y $R_{ti}$ es para el $i$ º muestreo longitud.
$R_{zJIS}$	Norma Industrial Japonesa para $R_z$ sobre la base de los cinco picos más altos y valles más bajos durante todo el muestreo de longitud.	$R_{zJIS} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{pi} - R_{vi}$ , Donde $R_{pi}$ son los $i$ º $p$ º pico más alto y más bajo del valle, respectivamente.

Los parámetros anteriores se basan en la relación con la curva de Abbott-Firestone de la figura 5.

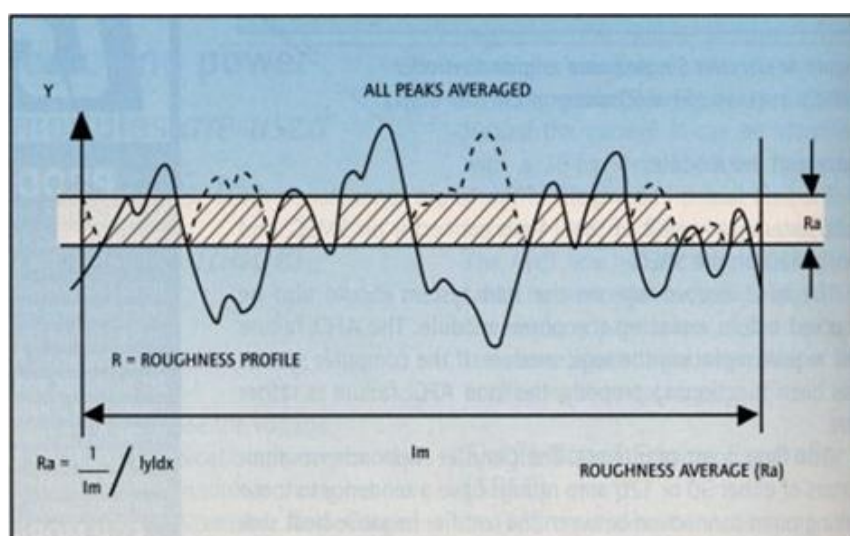


Figura 5. Curva Abbott - Firestone

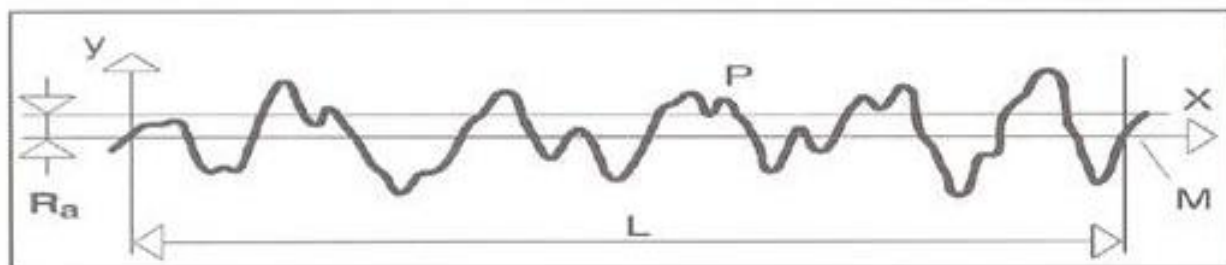


- *Línea media*

Para analizar este tipo de curvas hay que comenzar a observarlas por medio de su línea media. Se define este valor medio como aquella profundidad en la rugosidad a la cual se alcanza una proporción de aire y material igual al 50%, es decir, el nivel al cual se encuentra la misma cantidad de aire que de material.

- *Ra*

El Ra es uno de los parámetros más utilizados para medir los perfiles irregulares de una superficie. Al tomar las lecturas Ra, da como resultado un porcentaje de irregularidades, redistribuye material de los excesivos picos que presenta una superficie rugosa. El Ra se puede medir con instrumentos especiales que registren zonas irregulares en superficies de piezas, en la gráfica de Ra se muestra un conjunto de picos, estas zonas demuestran las regiones de la superficie medida que presentan variaciones a lo largo de una longitud determinada, como se muestra en la figura 6.



*Figura 6. Gráfica de Ra para medición de acabado*

- *Rz*

El parámetro  $R_z$  indica la altura máxima del perfil de rugosidad. Es la suma de la altura del mayor pico del perfil  $R_p$  y de la profundidad del fondo más bajo del perfil  $R_v$  dentro de un recorrido de medición individual. Como distancia vertical desde el punto de perfil más alto al más bajo,  $R_z$  es una medida de la dispersión de los valores de ordenadas de la rugosidad, como

se observa en la figura 7.

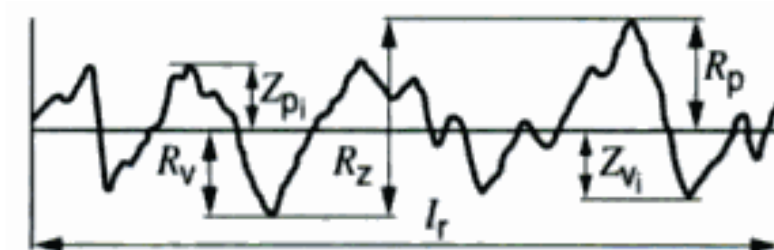


Figura7. Altura máxima del perfil de rugosidad  $R_z$

○  $Rmr_{(c)}$

$Rmr_{(c)}$  indica la proporción de material del perfil de rugosidad. La curva de proporción de material indica la proporción de material como función de la altura de corte "c". El coeficiente se obtiene mediante una relación porcentual entre la suma de las longitudes del material  $MI(c)$  de los elementos del perfil en una altura de corte predefinida "c" y el recorrido de medición  $l_r$ . Como se ve en la figura 8.

$$Rmr_{(c)} = \frac{MI_{(c)}}{L}$$

$$Rmr_{(c)} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{L}$$

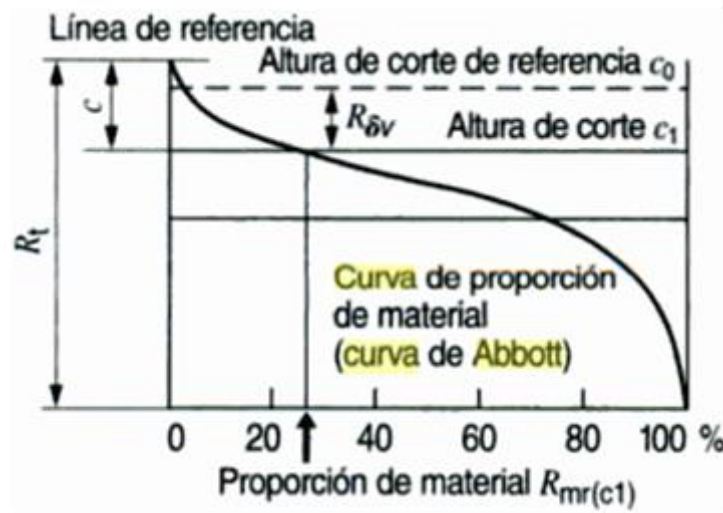


Figura 8. Proporción de material del perfil de rugosidad  $R_{mr}(c)$

Por lo tanto la curva de Abbott-Firestone se entiende como la representación de los diferentes niveles  $c$  frente a  $R_{mr}(c)$ .

- $R_k, R_{pk}, R_{vk}, M_{r1}, M_{r2}$

La curva de proporción de material (o Curva de Abbott- Firestone) en la figura 9, calculada a partir del perfil de rugosidad filtrado, se divide en áreas de perfil caracterizadas por magnitudes (profundidad y rugosidad de núcleo  $R_k$ , altura reducida de pico  $R_{pk}$  y profundidad reducida de estría  $R_{vk}$ ). Las magnitudes  $M_{r1}$  y  $M_{r2}$  indican la proporción de material en los límites del perfil del núcleo de la rugosidad.

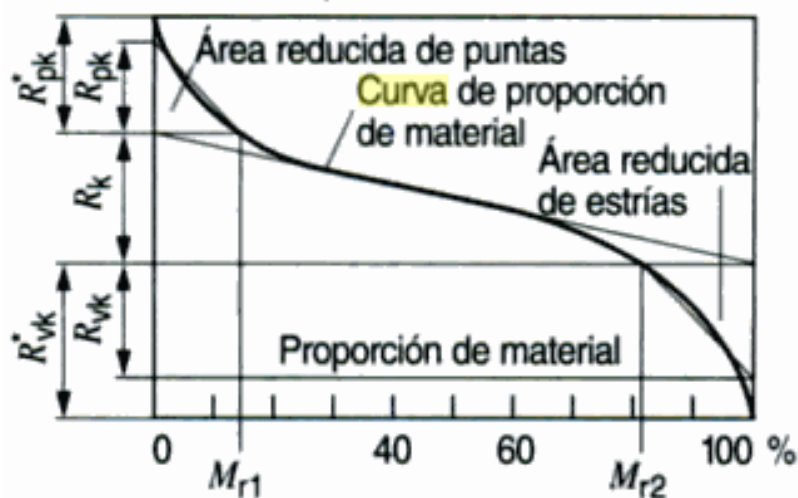


Figura 9. Gráfica de magnitudes de proporción de material

### Curva Abbott-Firestone

La curva de Abbott-Firestone es también llamada “curva de tasa de material del perfil”. Analiza la relación entre aire y material en diferentes profundidades.

Esta curva se representa por dos ejes, el horizontal donde aparece la relación entre material y aire, y el vertical que muestra la capa o nivel donde se mide esta relación. De esta forma un 0 en el eje horizontal (sería todo aire, nada de material) le corresponde un 100 en el vertical (en la parte más superficial de la pieza) y viceversa. El ejemplo de construcción se observa en la figura 10.

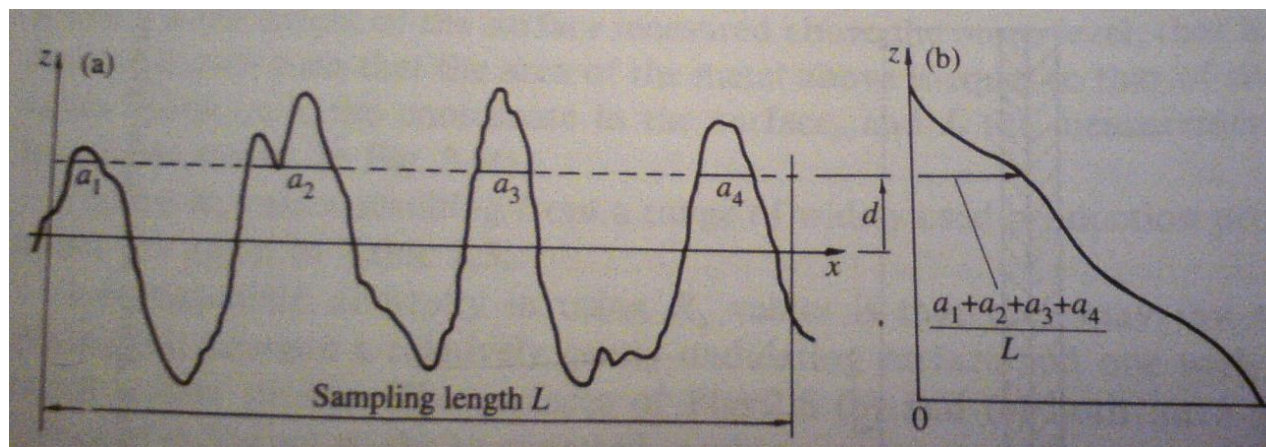


Figura 10. Construcción de Curva Abbott-Firestone

En esta imagen se puede observar cómo se construye una curva de Abbott-Firestone. Se ve como las medidas  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  se corresponden con la proporción de material en la línea elegida.

Y la medida  $L$  es la longitud total de la pieza que se analiza. Con estos parámetros se obtiene la proporción de aire-material a diferentes profundidades de estudio.

### 2.3.2. Normativa UNE-EN-ISO 4287 con respecto a la rugosidad

Los parámetros mencionados antes y todo lo escrito relacionado con la rugosidad siguen las normativas:

- ISO 3274:1996- Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Características nominales de los instrumentos de contacto (palpador).
- ISO 4288:1996- Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial.

ISO 11562:1996- Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial:

## **2.4. Adhesión**

### **2.4.1. Definición.**

La adhesión corresponde a todas las fuerzas o mecanismos que mantiene unido el adhesivo con cada sustrato, el término de adhesión se refiere a una fina capa (capa límite) que existe entre el sustrato y el propio adhesivo.



Figura 11: Esquema básico de una unión adhesiva

Las uniones adhesivas presentan las siguientes ventajas con respecto a otros métodos de ensamblaje de materiales:

- Distribución uniforme de tensiones.
- Rigidización de las uniones.
- No se produce distorsión del sustrato.
- Permiten la unión económica de distintos materiales.
- Uniones selladas.
- Aislamiento.
- Reducción del número de componentes.
- Mejora del aspecto del producto.
- Compatibilidad del producto.
- Uniones híbridas.

En la definición de adhesión se utiliza 2 conceptos importantes a definir:

- Fuerza o mecanismos que mantiene unido el adhesivo con cada sustrato.
- Capa límite.

Las fuerzas o mecanismos se refieren tanto a las fuerzas creadas por las fuerzas intermoleculares, los enlaces químicos, así como mecanismos de anclaje mediante rugosidad, adsorción y difusión.

El fenómeno de adsorción se produce cuando parte de los polímeros del adhesivo entra en contacto con el sustrato pero no lo atraviesan, manteniéndose unidos a este mediante la acción de las fuerzas intermoleculares y/o enlaces químicos que se desarrollan en la zona de adhesión denominada capa límite o interfase. Podemos definir la adsorción como la adhesión del adhesivo sin penetración al sustrato.

Por el contrario en el fenómeno de difusión parte los polímeros que conforma el adhesivos atraviesa al sustrato, generando puntos unión y anclaje entrelazando ambos materiales. Podemos definir la difusión como la adhesión del adhesivo con penetración al sustrato.

La capa límite se refiere a una fina capa correspondiente a las interfases entre el sustrato y el adhesivo en donde se producen todas las fuerzas mencionadas anteriormente.

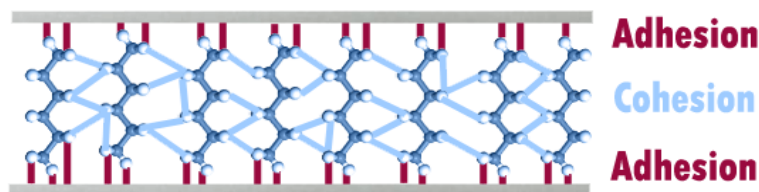


Figura 12: Diferencia adhesión-cohesión.

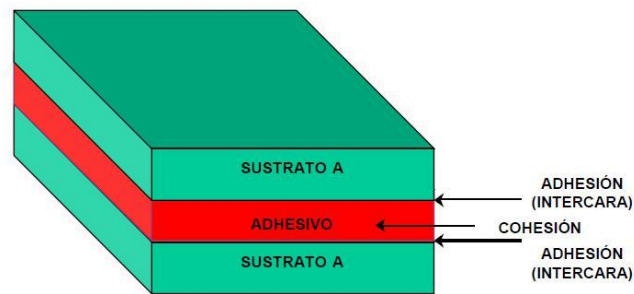


Figura 13: Diferencia entre adhesión y cohesión.

La adhesión está parametrizada bajo 2 conceptos:

Energía de adhesión: representa la suma de todas las energías producidas por las interacciones (enlaces químicos, momentos dipolares, así como fuerzas electrostáticas y mecanismos de anclaje, adsorción y difusión.) que se desarrollan en la capa límite.

Trabajo reversible de adhesión: Representa el trabajo que tenemos que aplicar para superar la suma de todas las interacciones o fuerzas y mecanismos que se desarrollan en la capa límite.

Podemos evaluar la adhesión de dos sustratos simplemente realizando un ensayo de rotura de la unión adhesiva. Así, el fallo de una unión adhesiva puede ocurrir según tres posibles modos:

- Separación por adhesión: cuando la separación se produce en la interfase sustrato-adhesivo.
- Separación por cohesión: cuando se produce la ruptura del adhesivo.
- Ruptura de sustrato: cuando el propio sustrato rompe antes que la unión adhesiva o que la interfase sustrato-adhesivo.



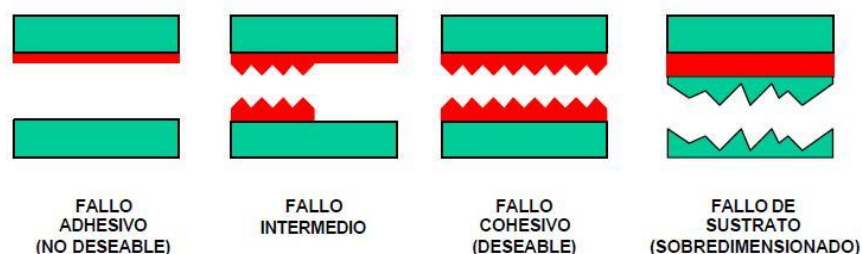


Figura 14: Modos de fallo de las uniones adhesivas.

### **2.4.2. Teorías sobre la adhesión. Modelos de adhesión.**

En la actualidad existen varias teorías que tratan de explicar el fenómeno de adhesión de los adhesivos en los sustratos, actualmente no existe una teoría unificada que justifique todos los casos, es necesario el uso y combinación de las distintas teorías para justificar casos particulares. En nuestro caso particular, para el aluminio, estos serían los modelos de adhesión que se pueden tener en cuenta.

- **Teoría mecánica de la adhesión.**

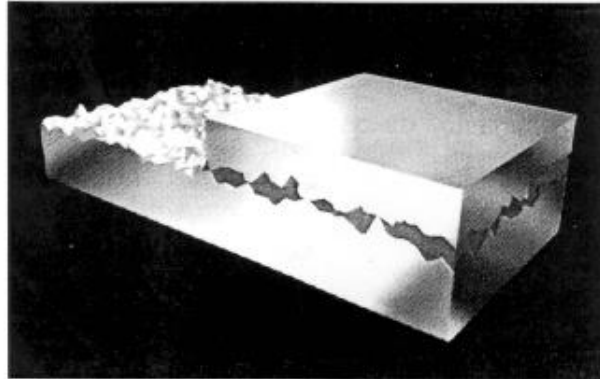
La teoría mecánica explica el fenómeno de la adhesión relacionando directamente la porosidad y rugosidad de la superficie del sustrato con el grado de adhesión que se puede obtener.

Cualquier tipo de material si es observado a nivel microscópico, dispone de una superficie compuesta por valles y crestas, esta topografía superficial permite al adhesivo penetrar y rellenar los valles, produciéndose zonas de anclajes entre el adhesivo y el sustrato.

A parte de la rugosidad y porosidad de la superficie del sustrato, para que se genere puntos de anclajes y adhesión, es necesario que el adhesivo disponga de un buen poder de relleno, es decir que el adhesivo pueda penetrar en los valles y poros de la superficie de sustrato, el poder de relleno del adhesivo está directamente relacionado con su viscosidad.

La teoría de adhesión mecánica no tiene en cuenta las incompatibilidades que puede existir entre el adhesivo y el sustrato, únicamente tiene en cuenta la topografía del sustrato y el poder de relleno del adhesivo, por ello esta teoría es incapaz de explicar la adhesión entre

superficies con baja rugosidad o lisas, así como la falta de adhesión entre sustratos rugosos con adhesivos incompatibles.



**Figura 15: Modelo de adhesión mecánica**

- **El modelo de adhesión química. La teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial.**

Esta teoría explica muchas de las uniones adhesivas que se realizan habitualmente. Al poner en contacto íntimo dos sólidos no importa que haya o no difusión porque cuando se produce, las fuerzas intermoleculares que se desarrollan en la interfase son suficientes para garantizar una adhesión del mismo orden de magnitud, no existiendo por tanto una frontera clara entre difusión y adsorción termodinámica. En esta teoría estas fuerzas se denominan "fuerzas de humectación o mojabilidad" porque cuando se forma una unión adhesiva se pasa por una fase de contacto entre el líquido y el sólido, y este proceso es al fin y al cabo de mojado.

En general, se distinguen diferentes tipos de fuerzas involucradas en el fenómeno de adsorción:



Enlaces secundarios:

Fuerzas de van der Waals.

Puentes de hidrógeno.

Enlaces primarios:

Enlace iónico.

Enlace covalente.

A pesar de su debilidad relativa, los enlaces secundarios generan en la práctica uniones suficientemente fuertes, dado que la superficie que entra en juego es considerable. Los enlaces primarios mejoran la durabilidad de las adhesiones y suelen ser necesarios para la adhesión de materiales cerámicos y vidrio.

- **Teoría electrostática**

La teoría electrostática asemeja el fenómeno de la adhesión al de un condensador, donde las cargas electrostáticas de signo opuesto se atraen mutuamente generando la adhesión entre el adhesivo y el sustrato.

Este modelo utiliza el concepto de la doble capa eléctrica para explicar la formación de las cargas electrostáticas



### **2.4.3. Mecanismos de fallo de las uniones adhesivas**

Como se vio, el mecanismo de una unión adhesiva depende de la fuerza de unión entre el sustrato y el adhesivo (adhesión) y de las fuerzas internas del adhesivo (cohesión). Además, la función principal de una unión adhesiva estructural es transmitir una carga externa a los demás miembros estructurales. Si la unión no es capaz de transmitir la carga de una manera adecuada, sufrirá un daño que posiblemente desembocará en el fallo de la unión.

Así, las uniones por adhesivo pueden fracasar adhesiva o cohesivamente. La evaluación de la unión adhesiva una vez producida la fractura puede desvelar fallos que hayan sido producidos por un tratamiento inadecuado de las superficies a unir, por una falta de cohesión del adhesivo debida a una mezcla inadecuada o incluso por un curado inadecuado, en el que el adhesivo no haya alcanzado las propiedades mecánicas deseadas.

Cuando en el estudio de una unión adhesiva, se trate de determinar las condiciones en que fallará un elemento estructural hay que tener en cuenta la posible existencia de defectos. Los poros, huecos y grietas son defectos intrínsecos del propio material y derivados de los métodos de fabricación de la unión.

En el caso de las grietas se pueden encontrar en la interfase del adhesivo sustrato y originará un desgarro de la unión, produciendo la rotura adhesiva. Pero también encontramos grietas en el adhesivo, que pueden romper los enlaces cohesivos del material y romper la unión. Los poros suelen ser derivados del proceso de aplicación del adhesivo y, aunque por su diminuto tamaño puedan parecer aceptables cuando la unión es solicitada a esfuerzos continuos o cíclicos, pueden ser muy desfavorables.

Cuando el fallo de la unión es adhesivamente, es decir, despegue del adhesivo del sustrato, es importante prestar una especial atención al proceso de fabricación de la unión. En algunas ocasiones un tratamiento inadecuado de los sustratos es la causa del fallo de la unión.

También ocurre que no hay adhesión debido a las reacciones químicas que se producen


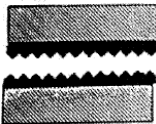
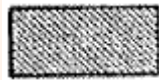
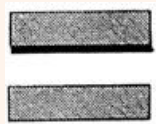
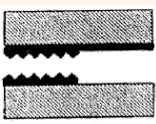



entre el adhesivo y el sustrato, en estos casos se precisa de imprimaciones para mejorar la adherencia. Así, cada unión debe ser proyectada para unas condiciones específicas, pues 10 que en unas ocasiones puede ser causa de fallo, en otras puede ser aceptable sin afectar a la resistencia real de la unión.

Los posibles modos de fallo que se pueden presentar en las uniones adhesivas, pueden resumirse en tres posibles modos de fallo:



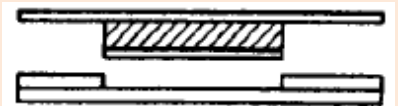
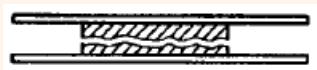
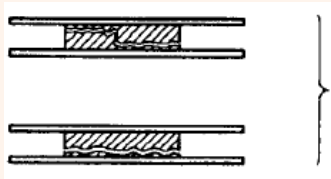
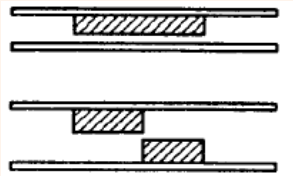
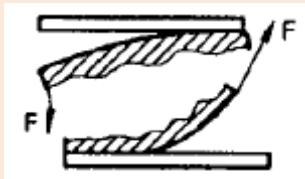
- Fallo adhesivo: Es el fallo de la unión de las interfases entre el sustrato y el adhesivo.
- Fallo cohesivo: Se produce cuando la fractura es en el adhesivo, rompiéndose las fuerzas de cohesión del mismo.
- Fallo del sustrato: en algunos casos se produce la rotura en el sustrato antes que en la unión adhesiva

Tabla 3. Fallos de unión

Tipo de fallo cohesivo		
		<b>Fallo cohesivo.</b> Rotura cohesiva del material de unión Este tipo de rotura es la más deseable.
<b>Adhesivo</b>		
		<b>Fallo adhesivo.</b> Separación en la interfase sustrato adhesivo Este tipo de rotura es el más desfavorable y el menos deseable. Es muy difícil predecir en qué casos ocurrirá la rotura adhesiva, pues la magnitud de las fuerzas de adherencia depende de numerosos factores, y difícilmente se pueden controlar en su totalidad.
<b>Sustrato</b>		
		<b>Fallo 50 %cohesivo - 50% adhesivo.</b> Este tipo de rotura es débil y se puede considerar como intermedia entre los dos tipos de rotura anteriores.
		<b>Fallo del sustrato.</b> En este tipo de rotura el sustrato falla antes que el adhesivo y se deduce que el adhesivo ha sido sobredimensionado. Este tipo de rotura puede desembocar en colapsos de la estructura muy peligrosos debido al uso de un adhesivo inadecuado.

En la norma UNE-EN ISO 10365, Designación de los principales modelos de rotura, encontramos la siguiente designación de los principales modelos de rotura de juntas adhesivas, ilustradas mediante diagramas sus principales formas de presentación, tal y como se muestra a continuación.

Tabla 4. Roturas de uniones

Modelos de rotura		
Sustrato		Rotura de uno o ambos sustratos. (Rotura de sustrato)
		Rotura de un sustrato (Rotura cohesiva de sustrato).
		Rotura por deslaminación.
Adhesivo		<b>Tipos de roturas cohesivas</b>
		Rotura cohesivo
		Rotura cohesiva especial
		
		Rotura adhesiva
		Rotura adhesiva y cohesiva con pelado



### 3. Parte experimental

Del material que se parte para realizar el estudio es el aluminio. El aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Se trata de un metal no ferromagnético. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis.

Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería de materiales, tales como su baja densidad ( $2.700 \text{ kg/m}^3$ ) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX el metal que más se utiliza después del acero.

#### Características físicas:

El aluminio es un elemento muy abundante en la naturaleza, sólo aventajado por el silicio y el oxígeno. Se trata de un metal ligero, con una densidad de  $2700 \text{ kg/m}^3$ , y con un bajo punto de fusión ( $660^\circ\text{C}$ ). Su color es blanco y refleja bien la radiación electromagnética del espectro visible y el térmico. Es buen conductor eléctrico (entre 34 y  $38 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$ ) y térmico ( $80 \text{ a } 230 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ).

#### Características mecánicas:

Mecánicamente es un material blando (Escala de Mohs: 2-3-4) y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de  $160\text{-}200 \text{ N/mm}^2$  ( $160\text{-}200 \text{ MPa}$ ). Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. También de





esta forma se utiliza como soldadura.

### **Características químicas:**

La capa de valencia del aluminio está poblada por tres electrones, por lo que su estado normal de oxidación es III. Esto hace que reaccione con el oxígeno de la atmósfera formando con rapidez una fina capa gris mate de alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que recubre el material, aislándolo de ulteriores corrosiones. Esta capa puede disolverse con ácido cítrico. A pesar de ello es tan estable que se usa con frecuencia para extraer otros metales de sus óxidos. Por lo demás, el aluminio se disuelve en ácidos y bases. Reacciona con facilidad con el ácido clorhídrico y el hidróxido sódico.

### **3.1. Preparación de las probetas.**

Para realizar la parte experimental de este proyecto utilizamos 3 probetas rectangulares de material aluminio como hemos explicado anteriormente. Cada probeta la lijamos de forma circular (con el fin de evitar la formación de surcos y de obtener una superficie más homogénea de tal manera que se minimicen los errores de cálculo que se puedan cometer) con un tipo diferente de lija. Se ha de procurar lijar toda la superficie de manera homogénea y también se ha de evitar presionar de manera excesiva la probeta con la lija. De esa manera se evita producir la ondulación de esta, cosa que puede influir en los ensayos. Las lijas utilizadas serán:

- Lija de grano 2.
- Lija de grano 1000.
- Lija de lana de vidrio.

Todos los procesos se llevan a cabo mediante la utilización de guantes de látex para poder evitar la suciedad en las probetas que pueda hacer que se desvirtúen los resultados. Dicha suciedad puede ser desde la grasa o sudor corporal, hasta cualquier tipo de sustancia que puedan contener las manos.



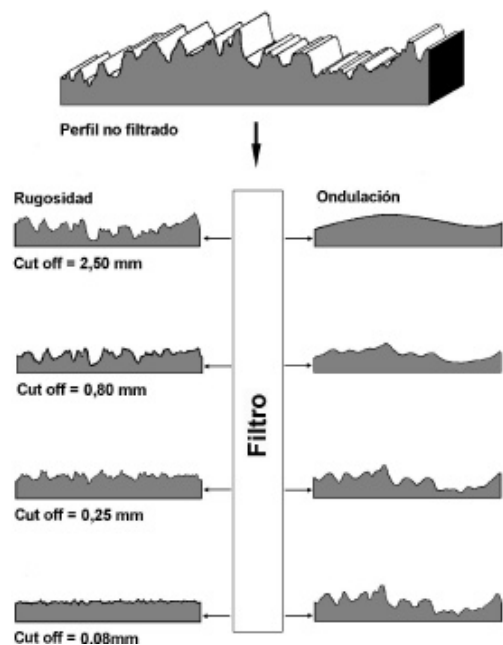
### **3.2. Cálculo de la rugosidad**

Una vez lijadas las probetas se mide su rugosidad con la ayuda de un rugosímetro. El rugosímetro es un dispositivo dotado de un palpador de diamante que, desplazando una cierta longitud sobre el material, es capaz de ampliar el paisaje de crestas y valles que presenta su superficie real y que no puede ser observada por el ojo humano y convertir estas irregularidades en señales eléctricas.

Para poder minimizar los errores en el lijado, se mide a lo largo y sobre la superficie lijada, cada probeta 10 veces desde diferentes longitudes, de esa forma se obtienen resultados mucho más acordes con la realidad y se ofrece la posibilidad de poder realizar una media de todos ellos llegando a un resultado más exacto del que se podría obtener de una sola medición.

El rugosímetro permite la visualización de las curvas de ondulación, rugosidad, perfil y la curva de Abbott-Firestone. Además, ofrece una tabla con una serie de parámetros que aportan el valor numérico de la rugosidad de acuerdo con las reglas de normalización a las que este tipo de sistemas de medida están sujetos. Para determinar dichos parámetros, definidos como  $R_a$  o  $R_z$ , el propio equipo divide su recorrido en seis partes: la primera etapa la emplea para la toma de referencias y la corrección de curvaturas; y sobre las otras cinco, realiza las medidas.

Para eliminar el efecto de la ondulación y quedarse sólo con la rugosidad de la superficie, como si esta fuese plana, el rugosímetro en la etapa de corrección de curvaturas realiza el filtrado como en la figura 16.



*Figura 16. Filtrado de perfiles*

Una vez que se han impreso las diferentes curvas se utiliza un curvímeter para medir la longitud del perfil, la longitud del perfil de ondulación y la longitud del perfil de rugosidad.

El curvímeter es un aparato de medición cuyo objetivo es medir la distancia o longitud existente entre dos puntos de un plano de forma precisa sin tener en cuenta el desnivel. Está dotado de una pequeña rueda con la que se recorre la línea a medir.

Para la curva de Abbott-Firestone se utiliza un planímetro. Un planímetro es un aparato de medición utilizado para el cálculo de áreas irregulares. El modelo utilizado consta de un carro móvil que se desplaza sobre el plano a medir. Es necesario que el recorrido comience y termine exactamente en el mismo punto para que se indique la superficie comprendida.

Con el planímetro se miden las áreas de pico y valle que aparecen en la curva de Abbott-Firestone. También en esta gráfica se calcula la pendiente de la recta de tendencia. Al igual que en las gráficas de rugosidad, ondulación y perfil, en esta también se requiere hallar la escala para que los datos puedan ser tratados con corrección.

Se precisa la realización de estos pasos en todas las curvas de Abbott-Firestone de las 10 mediciones de cada tipo de probeta.

En la figura se indica las áreas medidas en la curva.

Al área en naranja de la derecha se denomina “**Área de pico 1**” y a la superficie rayada en azul se denomina “**Área de pico 2**”.

Al área en naranja de la izquierda se denomina “**Área de valle 1**” y a la superficie rayada en azul se denomina “**Área de valle 2**”.

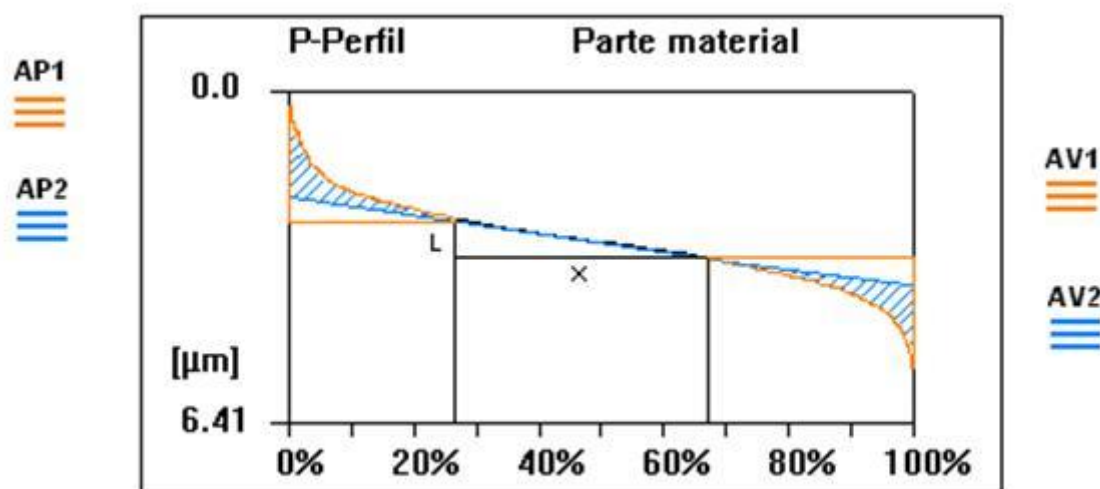


Figura 17. Áreas medidas en la Curva de Abbott-Firestone

### 3.3. Cálculo de la Adhesión

Una vez preparadas y lijadas las probetas mencionadas anteriormente nos disponemos a realizar el cálculo de la adhesión. El proceso consistirá en realiza el pegado de una serie de sufrideras a nuestras probetas para posteriormente someterlas a un ensayo en máquina de tracción.



El adhesivo usado para adherir las sufrideras será Sikaflex-252. De la misma forma usaremos una imprimación Sika Primer-204 N. El proceso de preparación de las probetas y sufrideras para su posterior ensayo, se realiza con el uso de guantes de látex para evitar suciedades en las probetas.

Podemos dividir el proceso total en 4 partes:

- Preparación de las probetas:
  - Se escogen 3 probetas de aluminio.
  - Lijamos cada probeta de la forma que se ha indicado anteriormente, con cada tipo de lija.
  - Finalmente se limpian las 3 probetas con metil-etil-cetona.
- Preparación de las sufrideras:
  - Para dejar totalmente limpia la sufridera inicialmente realizamos el lijado de su base con una lija de grano 1000 ya que nos permitirá dejar la superficie lo más uniforme posible sin sufrir mucho desgaste.
  - Aplicamos metil-etil-cetona en la superficie de la sufridera para dejarla totalmente libre de impurezas.
  - Aplicamos imprimación en la sufridera para mejorar la adhesión y que no se produzcan roturas indeseadas al realizar el ensayo de tracción.
- Aplicación del adhesivo:
  - Se añade el adhesivo en la sufridera y en la probeta.
  - Se deja secar durante un tiempo próximo a las 24 horas para que el adhesivo se asiente correctamente.
- Ensayo de tracción:
  - Sometemos a nuestro conjunto probeta-sufridera a un ensayo de tracción para determinar la fuerza que soporta el adhesivo antes de producirse el fallo. El equipo utilizado consiste en una mordaza de doble efecto. La sufridera se fija mediante una varilla atornillada unida a una célula, la cual

está unida a una célula de tensión que permite medir la fuerza de tracción que se quiere calcular. Después de tenerla fija por un lado a la varilla y por otro a la plataforma podemos elegir mediante un programa de software la velocidad de avance de la plataforma. En nuestro caso se ha optado por velocidades bajas (de 0,1 m/s) para evitar roturas bruscas o espontáneas del adhesivo para de esta forma obtener un dato de medida fiable.

- Mediante el software seleccionamos la opción que indica la medición de la fuerza máxima que ofrece el adhesivo a la tracción. Puede que no exista una separación total entre sufridera y probeta. Esto se explica dado que la fuerza máxima de tracción no es aquella que permite la separación de la unión probeta-sustrato sino aquella que rompe el adhesivo o el sustrato. Se deben obtener distintas fuerzas para cada tipo de lijado.
- Finalmente realizamos de nuevo el proceso de pegado de la probeta-sufridera como se ha explicado anteriormente y se repite todo el proceso ocho veces más.

## **4. Resultados.**

### **4.1. Resultados obtenidos del rugosímetro.**

Al introducir cada probeta en el rugosímetro se realiza una medición lineal sobre la probeta obteniéndose distintas gráficas con distintos datos con los cuales se trabaja. Es aconsejable obtener mediciones lineales de diferentes orientaciones para de esa forma obtener unos datos más fiables. Por esta razón realizamos el proceso 10 veces para cada tipo de lijado.

En las gráficas obtenidas mediante el software del rugosímetro se pueden ver los resultados con los cuales se va a trabajar, dichos resultados son los diferentes parámetros de la rugosidad, las gráficas de rugosidad y la curva de Abbott-Firestone.



A continuación se muestra los resultados obtenidos un ensayo de cada tipo de lijado con las gráficas y datos correspondientes.

#### 4.1.1. Aluminio con lija grano 1000 (PE.1000)

El proceso para obtener todos los datos expresados en las siguientes gráficas y tablas es:

- Se realizan 10 medidas con el rugosímetro para esta probeta
- Con cada medición se obtiene un  $R_a$  y una gráficas de rugosidad, ondulación y perfil.
- Se establece la escala y se realiza un promedio de 5 medidas realizadas con el curvómetro de cada gráfica.
- Una vez obtenidas las 10 mediciones reales se realiza otro promedio de cada una de ellas (rugosidad, ondulación y perfil) y se incluyen en la tabla.
- El proceso para obtener la medida real se repite para las 10 mediciones, y para cada tipo de lijado.
- Se obtiene la medida real multiplicando la escala por el promedio de las 5 mediciones.

Seguidamente se muestran los distintos tipos de gráficas que nos ofrece el programa para su medición.

Tabla 5. Parámetros obtenidos con el software

Condiciones	Parámetros			
HOMMELWERKE	Rt	6.02 $\mu\text{m}$	Rk	1.42 $\mu\text{m}$
Turbo Datawin-NT 1	Rmax	6.02 $\mu\text{m}$	Rpk	0.57 $\mu\text{m}$
Condiciones de medición	Rz	3.70 $\mu\text{m}$	Rvk	0.95 $\mu\text{m}$
Tipo de palpador T5E	Ra	0.49 $\mu\text{m}$	Mr1	7.0 %
Zona de medición 80 $\mu\text{m}$	Rp	2.19 $\mu\text{m}$	Mr2	84.8 %
Trayecto de medición 4.80 mm	RSm	0.037 mm	Rmr01(50.0 %)	2.11 $\mu\text{m}$
Le [Cut Off] 0.800 mm				

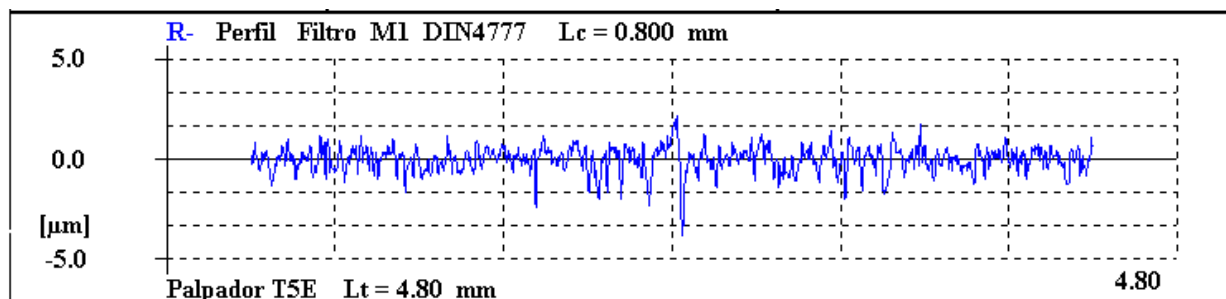


Figura 18. Gráfica de rugosidad

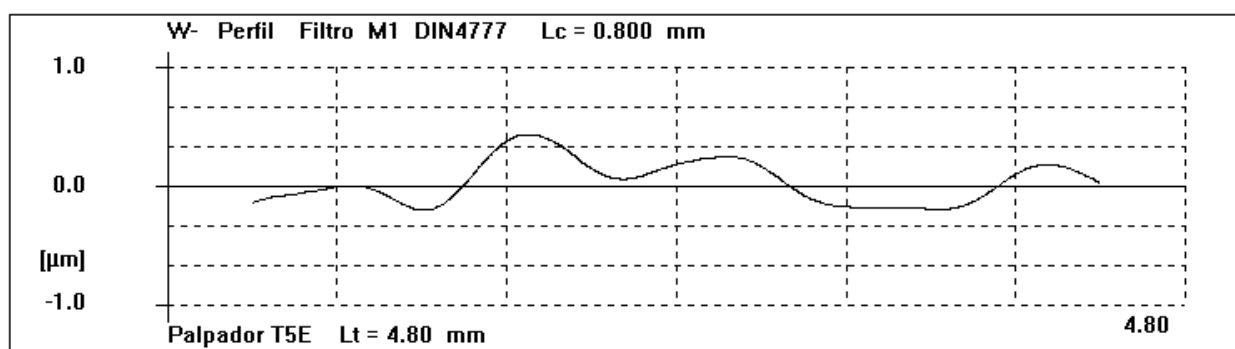


Figura 19. Gráfica Ondulación

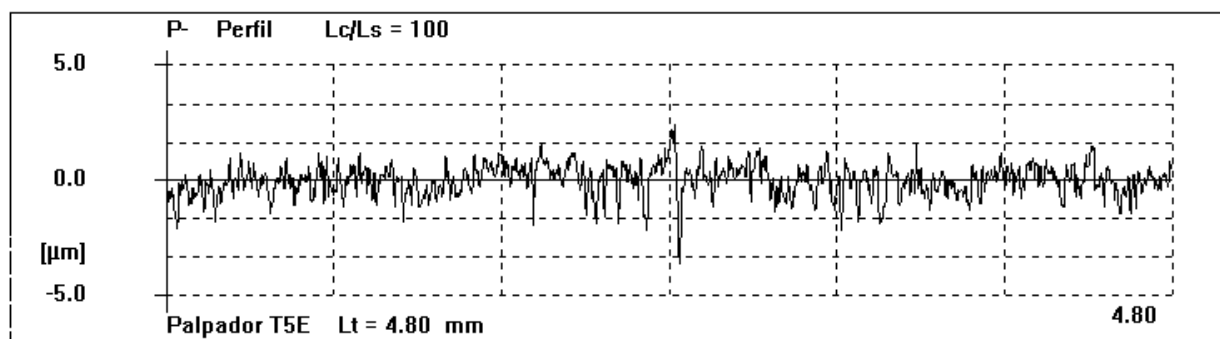


Figura 20. Gráfica Perfil (Rugosidad + Ondulación)

Se cogió el valor de Ra de cada uno de las medidas, se midió el perfil de estas gráficas con el curvímeter y se obtuvieron las siguientes medidas recogidas en la tabla que se muestra a continuación. Las medidas representadas en la siguiente tabla corresponden directamente con



la media ya hecha de cada una de las cinco medidas hechas con el curvómetro por medida.

*Tabla 6. Medidas tomadas con el curvómetro*

AL.1000	Ra (mm)	Longitud perfil (mm)	Longitud ondulación (mm)	Longitud rugosidad (mm)
1	0,00049	38,74	5,33	32,84
2	0,00049	36,62	5,17	53,93
3	0,00018	35,58	5,57	34,95
4	0,00054	30,9	5,78	27,94
5	0,00066	33,15	5,58	32,57
6	0,0007	32,06	5,57	30,18
7	0,00056	32,61	5,44	27,727
8	0,0006	34,83	5,66	31,49
9	0,00064	37,69	5,39	36,8
10	0,00069	38,11	5,9	35,41
Media	0,000555	35,029	5,539	34,3837

Las longitudes tanto de perfil, de ondulación como de rugosidad se calcularon también como superficies recogidas en la tabla 12.

*Tabla 7. Cálculo del perfil, ondulación y rugosidad como superficie*

AL.1000	Superficie perfil (mm <sup>2</sup> )	Superficie ondulación (mm <sup>2</sup> )	Superficie rugosidad (mm <sup>2</sup> )
1	1500,7876	28,4089	1078,4656
2	1341,0244	26,7289	2908,4449
3	1265,9364	31,0249	1221,5025
4	954,81	33,4084	780,6436
5	1098,9225	31,1364	1060,8049
6	1027,8436	31,0249	910,8324
7	1063,4121	29,5936	768,786529

8	1213,1289	32,0356	991,6201
9	1420,5361	29,0521	1354,24
10	1452,3721	34,81	1253,8681
Media	1233,87737	30,72237	1232,920863

### ○ Curva de Abbott-Firestone

En el apartado anterior se explicó los resultados que se obtienen de la medición de las gráficas de Abbott-Firestone. A continuación se expone un ejemplo de una de las curvas de las diez mediciones y una tabla con los valores obtenidos.

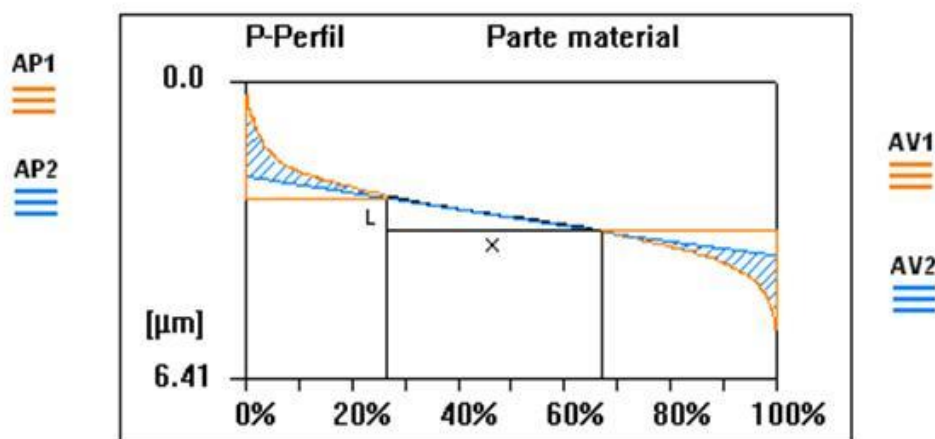


Figura 21. Curva de Abbott-Firestone

Se midió con el planímetro las diferentes áreas indicadas antes y se calculó la pendiente de la recta de tendencia según la fórmula, siendo  $L_r$  y  $x_r$  los datos escalados de  $L$  y  $x$ . Todo se recoge en la tabla 9.

$$m = \frac{L_r}{x_r}$$

Los resultados medidos se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 8. Resultados medidos en la curva de Abbott-Firestone

AL. 1000	Pendiente	Área pico 1 (mm <sup>2</sup> )	Área pico 2 (mm <sup>2</sup> )	Área valle 1 (mm <sup>2</sup> )	Área valle 1 (mm <sup>2</sup> )
1	0,231	0,00473	0,00355	0,0106	0,00827
2	0,137	0,00668	0,004	0,00801	0,00534
3	0,191	0,0152	0,0126	0,00505	0,00421
4	0,178	0,012	0,00756	0,0136	0,00906
5	0,21	0,03	0,018	0,016	0,01
6	0,227	0,00816	0,00326	0,0196	0,0147
7	0,133	0,00659	0,00439	0,0242	0,0132
8	0,208	0,00897	0,00449	0,0314	0,024
9	0,293	0,0142	0,00814	0,0142	0,00814
10	0,224	0,00987	0,00705	0,0113	0,00847
Media	0,2032	0,01164	0,007304	0,015396	0,010539

#### 4.1.2. Aluminio con lija de lana de vidrio (PE.LV)

Se opera de la misma forma con los diferentes tipos de lijas. De ello se obtiene los datos y las tablas que a continuación se muestran. En este caso referidas a las probetas lijadas con lija de lana de vidrio.

Tabla 9. Resultados del software

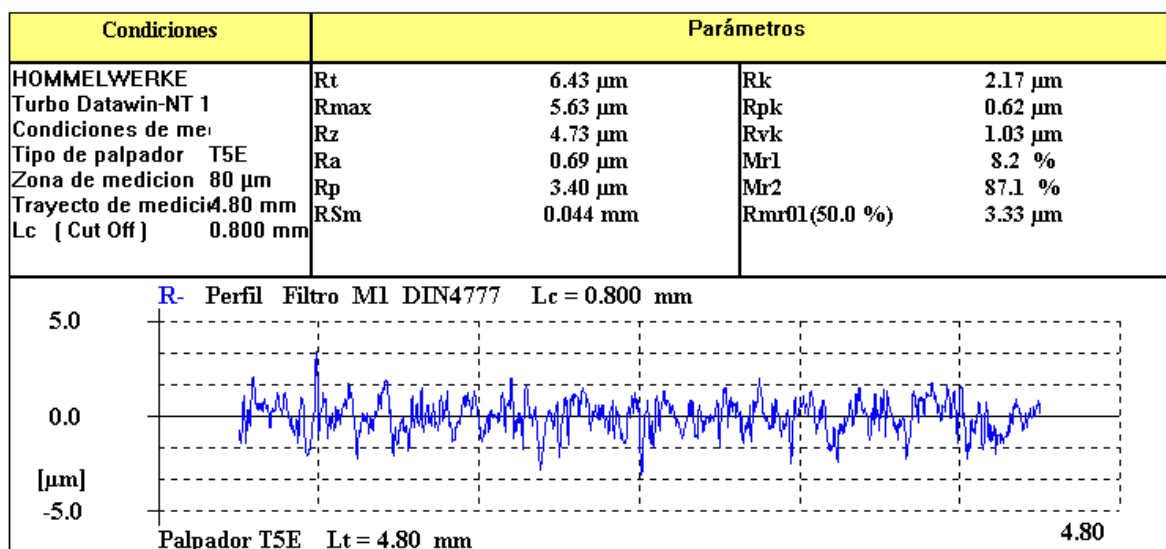


Figura 22. Gráfica de la rugosidad

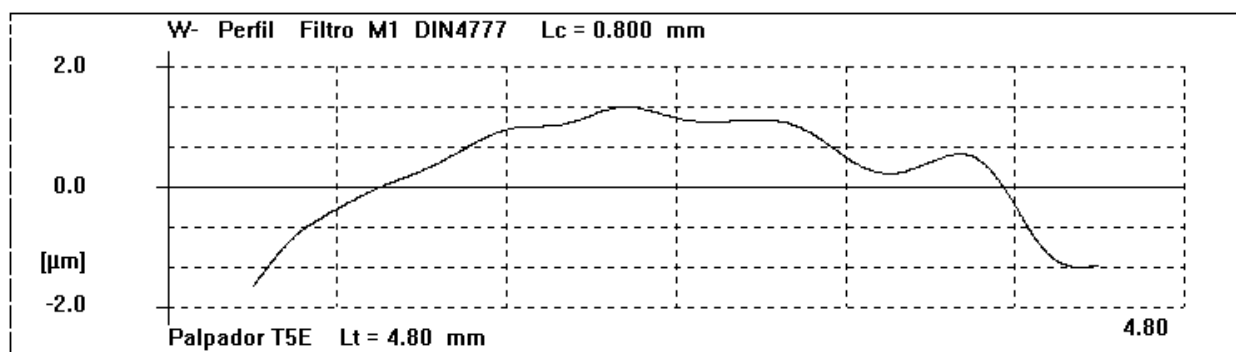


Figura 23. Gráfica de la ondulación

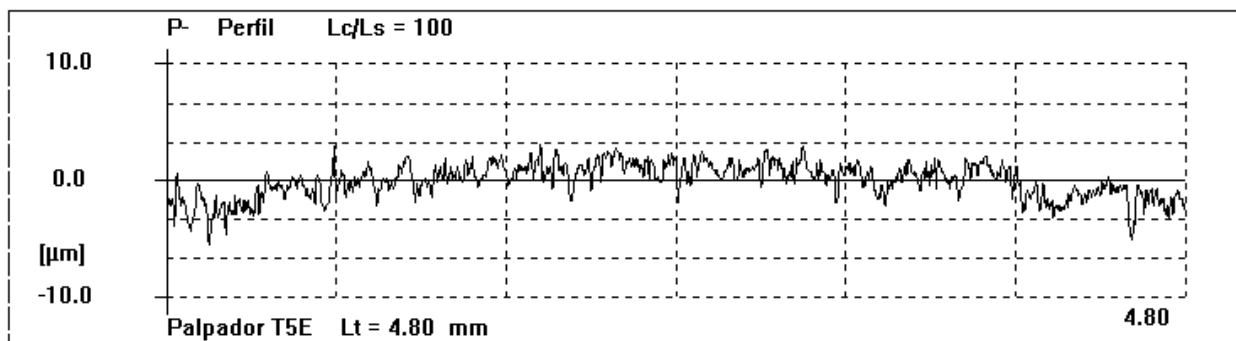


Figura 24. Gráfica de perfil (rugosidad + ondulación)

Se cogió el valor de Ra de cada uno de las medidas y se midió el perfil de estas gráficas con



el curvómetro y se obtuvieron las siguientes medidas recogidas en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 10. Cálculo del perfil, ondulación y rugosidad como superficie

AL.LV	Ra (mm)	Longitud perfil (mm)	Longitud ondulación (mm)	Longitud rugosidad (mm)
1	0,00069	19,69	5,38	34,88
2	0,00067	36,66	5,72	30,11
3	0,0006	29,8	5,59	27,3
4	0,00074	34,56	5,96	35,13
5	0,00072	33,09	5,68	32,71
6	0,00075	23,71	6,06	21,36
7	0,00073	38,26	6,18	37,62
8	0,00071	28,21	5,15	24,9
9	0,00068	24,09	5,59	37,87
10	0,0008	15,75	5,5	27,38
Media	0,000709	28,382	5,681	30,926

Las longitudes tanto de perfil, de ondulación como de rugosidad se calcularon también como superficies y aparecen en la tabla siguiente.

Tabla 11. Cálculo de superficies de rugosidad, ondulación y perfil

AL.LV	Superficie perfil (mm <sup>2</sup> )	Superficie ondulación (mm <sup>2</sup> )	Superficie rugosidad (mm <sup>2</sup> )
1	387,6961	28,9444	1216,6144
2	1343,9556	32,7184	906,6121
3	888,04	31,2481	745,29
4	1194,3936	35,5216	1234,1169
5	1094,9481	32,2624	1069,9441

6	562,1641	36,7236	456,2496
7	1463,8276	38,1924	1415,2644
8	795,8041	26,5225	620,01
9	580,3281	31,2481	1434,1369
10	248,0625	30,25	749,6644
Media	855,92198	32,36315	984,79028

### ○ Curva de Abbott-Firestone

La curva de Abbott- Firestone se obtiene también de la misma manera que se obtienen las otras gráficas se puede observar en la figura.

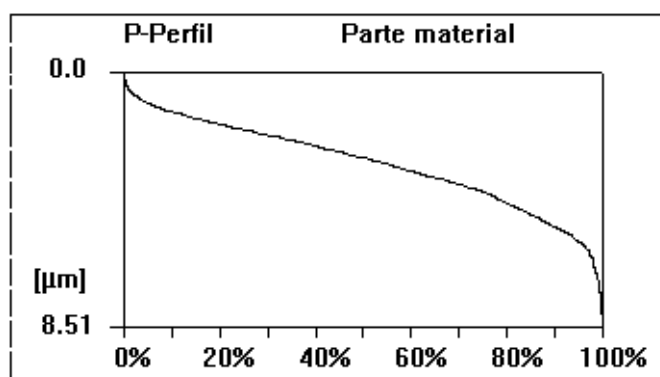


Figura 25. Curva de Abbott- Firestone

Se midió con el planímetro las diferentes áreas indicadas antes y se calculó la pendiente de la recta de tendencia según la fórmula de la pendiente.

Tabla 12. Resultados medidos en la curva de Abbott-Firestone

AL.LV	Pendiente	Área pico 1 (mm <sup>2</sup> )	Área pico 2 (mm <sup>2</sup> )	Área valle 1 (mm <sup>2</sup> )	Área valle 2 (mm <sup>2</sup> )
1	0,259	0,00945	0,00378	0,03	0,026
2	0,128	0,0156	0,0117	0,0195	0,0136
3	0,244	0,0087	0,0058	0,0189	0,0116



4	0,306	0,00905	0,00543	0,022	0,0145
5	0,154	0,00915	0,00457	0,0198	0,00762
6	0,194	0,0149	0,00993	0,0397	0,0174
7	0,205	0,0199	0,0122	0,0153	0,00917
8	0,159	0,0101	0,0081	0,0284	0,0142
9	0,321	0,00592	0,00395	0,0118	0,00789
10	0,107	0,00638	0,00479	0,0255	0,0191
Media	0,2077	0,010915	0,007025	0,02309	0,014108

#### 4.1.3. Aluminio con lija grano 2 (PE.2)

Se realiza de la misma forma anteriormente descrita con los diferentes tipos de lijas. De ello se obtiene los datos y las tablas que a continuación se muestran. En este caso referidas a las probetas lijadas con lija de grano 2.

Tabla 13. Parámetros obtenidos con el software

Condiciones	Parámetros			
HOMMELWERKE	Rt	15.86 $\mu\text{m}$	Rk	6.26 $\mu\text{m}$
Turbo Datawin-NT 1	Rmax	15.86 $\mu\text{m}$	Rpk	2.24 $\mu\text{m}$
Condiciones de medición	Rz	11.26 $\mu\text{m}$	Rvk	2.88 $\mu\text{m}$
Tipo de palpador T5E	Ra	1.88 $\mu\text{m}$	Mr1	7.0 %
Zona de medición 80 $\mu\text{m}$	Rp	8.42 $\mu\text{m}$	Mr2	87.7 %
Trayecto de medición 4.80 mm	RSm	0.071 mm	Rmr01(50.0 %)	8.49 $\mu\text{m}$
Lc [ Cut Off ] 0.800 mm				

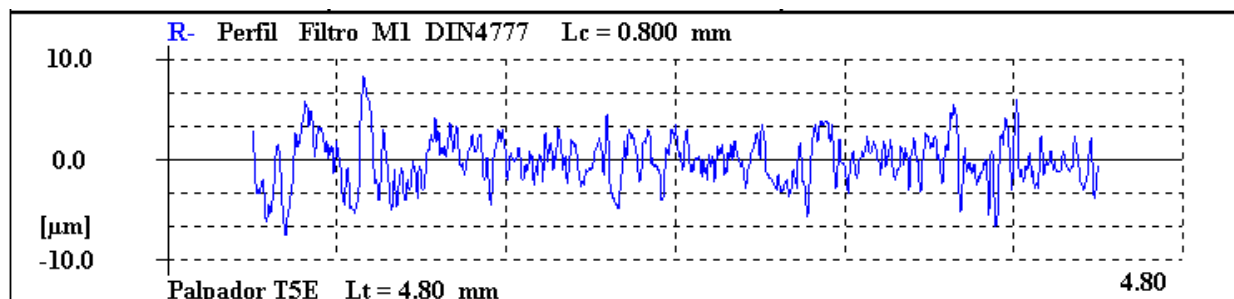


Figura 26. Gráfica Rugosidad

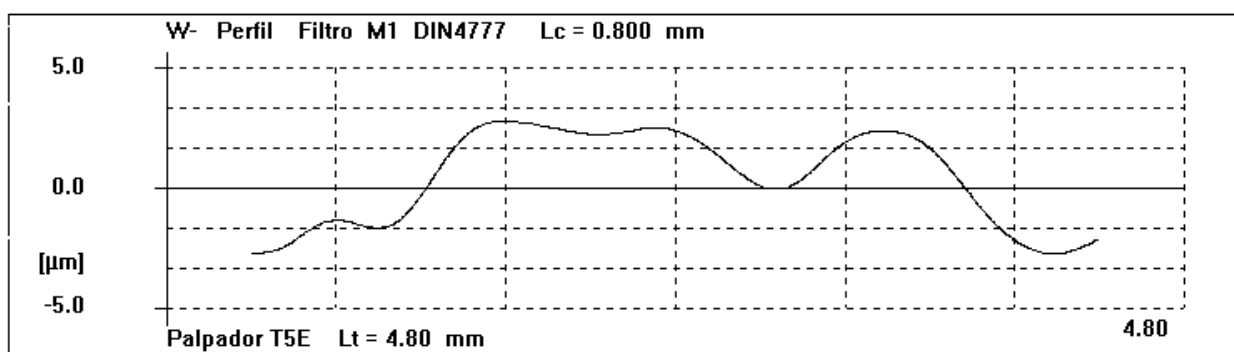


Figura 27. Gráfica Ondulación

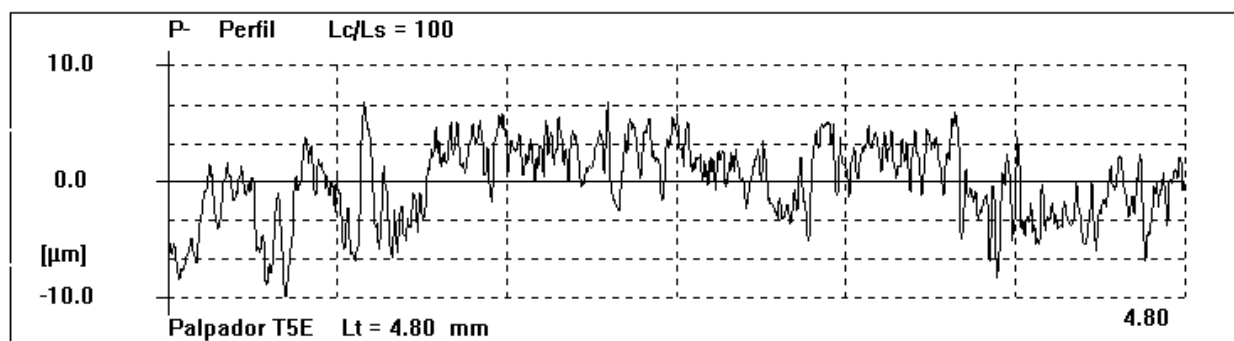


Figura 28. Gráfica Perfil (Rugosidad + Ondulación)

Se cogió el valor de Ra de cada uno de las medidas y se midió el perfil de estas gráficas con el curvímeter y se obtuvieron las siguientes medidas que se ven en la tabla siguiente.





Tabla 14. Medidas tomadas con el curvímetro

AL. 2	Ra (mm)	Longitud perfil (mm)	Longitud ondulación (mm)	Longitud rugosidad (mm)
1	0,00188	32,21	5,59	24,67
2	0,00176	32,2	6,93	28,43
3	0,00192	32,19	6	27,15
4	0,00169	24,74	5,6	23,27
5	0,00183	31,99	5,67	26,38
6	0,00213	21,37	6,22	22,61
7	0,00189	20,63	5,65	17,96
8	0,00179	17,15	5,66	28,59
9	0,00194	22,38	5,7	18,43
10	0,0018	18,85	5,69	18,38
Media	0,001863	25,371	5,871	23,587

Las longitudes tanto de perfil, de ondulación como de rugosidad se calcularon también como superficies recogidas en la tabla siguiente.

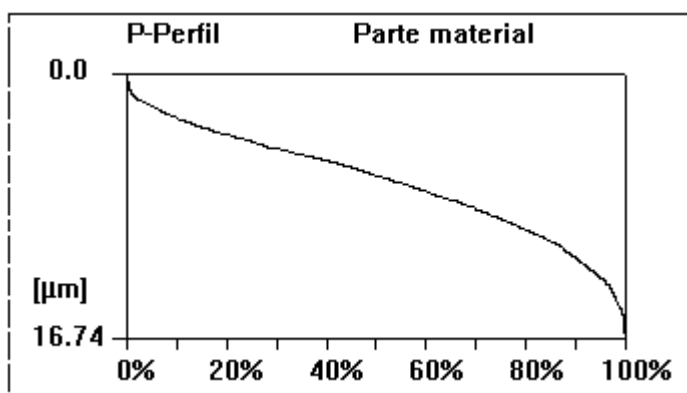
Tabla 15. Cálculo de superficies de perfil, ondulación y rugosidad

AL. 2	Superficie perfil (mm <sup>2</sup> )	Superficie ondulación (mm <sup>2</sup> )	Superficie rugosidad (mm <sup>2</sup> )
1	1037,4841	31,2481	608,6089
2	1036,84	48,0249	808,2649
3	1036,1961	36	737,1225
4	612,0676	31,36	541,4929
5	1023,3601	32,1489	695,9044
6	456,6769	38,6884	511,2121

<b>7</b>	425,5969	31,9225	322,5616
<b>8</b>	294,1225	32,0356	817,3881
<b>9</b>	500,8644	32,49	339,6649
<b>10</b>	355,3225	32,3761	337,8244
<b>Media</b>	677,85311	34,62945	572,00447

### ○ *Curva Abbott- Firestone*

La curva de Abbott- Firestone se obtiene también de la misma manera que se obtienen las otras gráficas se observa en la figura. En el apartado anterior se explicó qué se mide en las gráficas de Abbott-Firestone. A continuación se expone un ejemplo de una de las curvas de las diez mediciones y una tabla con los valores obtenidos.



*Figura 29. Curva de Abbott-Firestone*



Tabla 16. Resultados medidos en la curva de Abbott-Firestone

AL. 2	Pendiente	Área pico 1 (mm <sup>2</sup> )	Área pico 2 (mm <sup>2</sup> )	Área valle 1 (mm <sup>2</sup> )	Área valle 2 (mm <sup>2</sup> )
1	0,244	0,022	0,011	0,1	0,037
2	0,26	0,028	0,014	0,039	0,018
3	0,225	0,052	0,024	0,048	0,024
4	0,275	0,033	0,022	0,029	0,018
5	0,297	0,026	0,011	0,03	0,0075
6	0,217	0,064	0,054	0,032	0,022
7	0,152	0,043	0,012	0,073	0,037
8	0,183	0,034	0,019	0,039	0,024
9	0,199	0,066	0,025	0,045	0,024
10	0,135	0,04	0,03	0,043	0,035
Media	0,2187	0,0408	0,0222	0,0478	0,02465

## 5. Valores de adhesión

Se realizaron varias medidas de la tensión de adhesión en las diferentes probetas con el equipo. Los resultados que se obtienen son los que aparecen en tabla 26:

*Tabla 17. Medidas de la tensión de adhesión (MPa)*

Medida	PE.1000 (MPa)	PE.LV (MPa)	PE. 2 (MPa)
1	0,645142	0,524781	0,43751
2	0,453156	0,294107	0,269102
3	0,384791	0,16371	0,843258
4	0,361433	0,641981	0,410199
5	0,510698	0,555374	0,723405
6	0,291402	0,911065	0,800104
7	0,229078	0,599743	1,124712
8	0,354066	0,66817	1,00455
9	0,271132	0,992411	0,913294
10	0,510988	0,546981	0,873379
11	0,770145	0,974167	0,932714
12	1,125071	0,402638	1,390074
13	0,924519	0,42998	0,864123
14	0,690276	0,784333	0,934355
15	0,912101	0,640532	1,017586
16	0,701103	0,739941	0,588102
17	0,854078	0,708574	0,921573
18	0,674985	0,671143	0,681598
Media	0,59245356	0,6249795	0,81831322



### 5.1. Eliminación de datos

Una prueba estadística utilizada para la eliminación de los datos atípicos es el contraste de Grubbs. Cuando se escoge el nivel de significación 0,05 (ó 5%), se tiene un 95% de confianza de que se ha adoptado la decisión correcta y una probabilidad 0,05 de ser falsa.

Si se utiliza el contraste de Grubbs se observa si alguno de los valores de G calculados es mayor que el valor crítico de la tabla, que se muestra a continuación, según el grado de libertad que le corresponda.

Tabla 18. Valores crítico de G ( $P=0,05$ ) para un contraste de dos colas

Tamaño de muestra	Valor crítico
3	1,15
4	1,48
5	1,71
6	1,89
7	2,02
8	2,13
9	2,21
10	2,29
11	2,36
12	2,41
13	2,46
14	2,51
15	2,55
16	2,59
17	2,63
18	2,65



La fórmula para calcular G es:

$$G = \frac{|valor - \bar{x}|}{s}$$

○ *Probeta LV*

Tabla 19. Valores de tensión

Medida	Al.LV (MPa)
1	0,524781
2	0,294107
3	0,16371
4	0,641981
5	0,555374
6	0,911065
7	0,599743
8	0,66817
9	0,992411
10	0,546981
11	0,974167
12	0,402638
13	0,42998
14	0,784333
15	0,640532
16	0,739941

<b>17</b>	0,708574
<b>18</b>	0,671143
<b>Media</b>	0,6249795
<b>Desviación estándar</b>	0,21346609

Dentro de los valores de tensión de la adhesión de este tipo de probeta se encuentra una serie de valores atípicos. Dichos valores son: 0,992411 MPa y 0,974167 MPa. Se empieza calculando los valores extremos ya que si se pueden considerar válidos, los otros también se aceptan.

Se utiliza la siguiente fórmula para el cálculo de la desviación estándar:

$$s = \sqrt{s^2} \rightarrow s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

Por lo tanto:

- **Media = 0,625MPa**
- **S = 0,213**

Como el tamaño de la muestra es 18, el valor crítico es 2,65.

- *Para 0,992411 MPa*

$$G = \frac{0,992411 - 0,625}{0,213} = 1,72$$

Según la gráfica  $1,72 < 2,65$  por lo tanto este valor no se rechaza. Si hubiese dado un valor superior a 2,65 este valor se rechazaría y se procedería a un nuevo cálculo de la media, la desviación típica y el contraste de Grubbs con 17 valores.



*Para 0,974167 MPa*

Se obtiene un nuevo valor de la media y de la desviación típica, siendo estos:

- **Media= 0,625MPa**
- **S= 0,213**

$$G = \frac{0,974167 - 0,625}{0,213} = 1,64$$

Según la tabla  $1,64 < 2,65$  por lo tanto este valor no se rechaza.





○ *Probeta 1000*

Tabla 20. Valores de tensión

Medida	Al.1000 (MPa)
1	0,645142
2	0,453156
3	0,384791
4	0,361433
5	0,510698
6	0,291402
7	0,229078
8	0,354066
9	0,271132
10	0,510988
11	0,770145
12	1,125071
13	0,924519
14	0,690276
15	0,912101
16	0,701103
17	0,854078
18	0,674985
Media	0,59245356
Desviación estándar	0,25155903



El valor que se considera sospechoso es 1,125071 MPa.

- **Media =0,592 MPa**
- **S = 0,252**
- *Para 1,125071 MPa*

Como el tamaño de la muestra es 18, el valor crítico según la tabla ahora es 2,65.

$$G = \frac{1,125071 - 0,592}{0,252} = 2,115$$

Según la tabla  $2,115 < 2,65$  por lo tanto no se rechaza ningún valor.



○ *Probeta 2*

Tabla 21. Valores de tensión

Medida	PE. 2 (MPa)
1	0,43751
2	0,269102
3	0,843258
4	0,410199
5	0,723405
6	0,800104
7	1,124712
8	1,00455
9	0,913294
10	0,873379
11	0,932714
12	1,390074
13	0,864123
14	0,934355
15	1,017586
16	0,588102
17	0,921573
18	0,681598
Media	0,81831322
Desviación estándar	0,2626154



Los valores que se consideran sospechosos son 1,124712MPa, 1,00455 MPa, 1,390074 MPa y 1,017586 MPa.

- Media = 0,818 MPa
- $S = 0,263$
- *Para 1,124712MPa*

Como el tamaño de la muestra es 18, el valor crítico según la tabla ahora es 2,65.

$$G = \frac{1,124712 - 0,818}{0,263} = 1,166$$

Según la tabla  $1,166 < 2,65$  por tanto no se rechaza este valor.

- *Para 1,390074 MPa*

Como el tamaño de la muestra es 18, el valor crítico según la tabla ahora es 2,65.

$$G = \frac{1,390074 - 0,818}{0,263} = 2,175$$

Según la tabla  $1,166 < 2,65$  por tanto no se rechaza ningún valor.

No es necesario comprobar los resultados del resto de valores ya que son menores que los analizados y por lo tanto no se rechazarán.

## 6. Errores

Debido al gran número de medidas realizadas en laboratorio y la complejidad de estas, tanto las cometidas por el rugosímetro como las tomadas con los aparatos de medida y la máquina de tracción, nos vemos en la necesidad de realizar un cálculo de errores. Para esto, se establecen unos límites de confianza de la media para pequeñas muestras que vienen dados por la fórmula:

$$\bar{x} \pm \frac{t_{n-1} \cdot s}{\sqrt{n}}$$

- La letra n: número de grados de libertad.
- La letra s: desviación estándar de la muestra.
- La letra t: valor de la t-Student que se calcula según la tabla que se muestra a continuación.

Así mismo consideraremos un intervalo de confianza del 95 % debido a los pequeños errores de calibración que puedan tener los aparatos de medida.

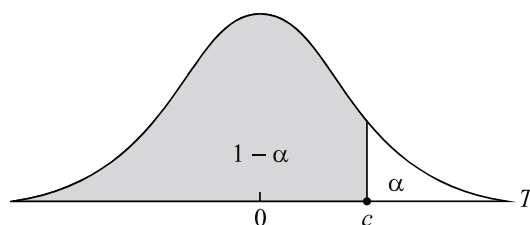


Figura 30: gráfica de confianza .



Tabla 22. Distribución *t*- Student, con *r* grados de libertad

$1 - \alpha$								
<i>r</i>	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845

### 6.1. Errores de medidas realizadas con el rugosímetro

Para las tres probetas se realizaron 10 medidas con el rugosímetro. En la fórmula que se muestra a continuación:

- $n$  = número total de medidas realizadas. En este caso  $n = 10$ .
- $t_{n-1}$  = valor de la t-Student. En este caso  $t_{n-1}$  por  $t_9 = 1,833$ .
- $\bar{x}$  = media de los valores obtenidos del rugosímetro.
- $s$  = desviación estándar de los valores obtenidos del rugosímetro.

Sustituimos en la fórmula y sacamos los valores de la siguiente tabla.

$$\bar{x} \pm \frac{t_{n-1} \cdot s}{\sqrt{n}}$$

Tabla 23. Errores para cada parámetro medido

Error	Ra (mm)	Longitud Perfil(mm)	Longitud Ondulación(mm)	Longitud Rugosidad(mm)
Probeta LV	0,0000312	4,337	0,183	3,255
Probeta 1000	0,0000883	1,599	0,125	4,350
Probeta 2	0,0000703	3,571	0,245	2,418

Tabla 24. Errores para cada parámetro medido

Error	Pendiente	Área valle 1 (mm <sup>2</sup> )	Área valle 2 (mm <sup>2</sup> )	Área pico 1 (mm <sup>2</sup> )	Área pico 2 (mm <sup>2</sup> )
Probeta LV	0,043	0,0026	0,0019	0,0047	0,0033
Probeta 1000	0,027	0,0042	0,0027	0,0046	0,0033
Probeta 2	0,030	0,009	0,0075	0,013	0,0055

Tabla 25. Errores para cada parámetro medido

Error	Superficie Perfil(mm <sup>2</sup> )	Superficie Ondulación(mm <sup>2</sup> )	Superficie Rugosidad(mm <sup>2</sup> )
Probeta LV	239,39	2,80	197,19
Probeta 1000	111,7246543	1,384779821	359,3018252
Probeta 2	183,86	3,05	111,94

## 6.2. Errores de ensayos de tracción

- PE LV, PE 1000 y PE 2

Para todas las probetas se tomaron 18 medidas de tensión de la adhesión. En todas esas probetas no se descartó ningún valor por medio del contraste de Grubbs, por lo que el número total de medidas  $n$  se considera 18. De ahí se obtiene un número de grados de libertad  $(n-1) = 17$  y una  $t_{17} = 1.740$ .

Se calcula la desviación estándar de los valores y se utiliza la ecuación 1 sustituyendo  $t_{n-1}$  por  $t_{17} = 1.740$  y se obtienen los errores mostrados en la tabla.

Tabla 26. Error y desviación estándar para el valor de la adhesión

Probeta	Desviación Estándar	Error
PE LV	0,213	0,088
PE 1000	0,252	0,103
PE 2	0,263	0,108



## 7. Resultados

Los resultados obtenidos anteriormente se recogen en gráficas en las que se comparan los diferentes parámetros de la rugosidad frente a la adhesión representada por el esfuerzo de tracción medido.

Para poder relacionar los parámetros de rugosidad medidos con la adhesión, se representan gráficamente cada uno de ellos frente a la resistencia de la unión adhesiva.

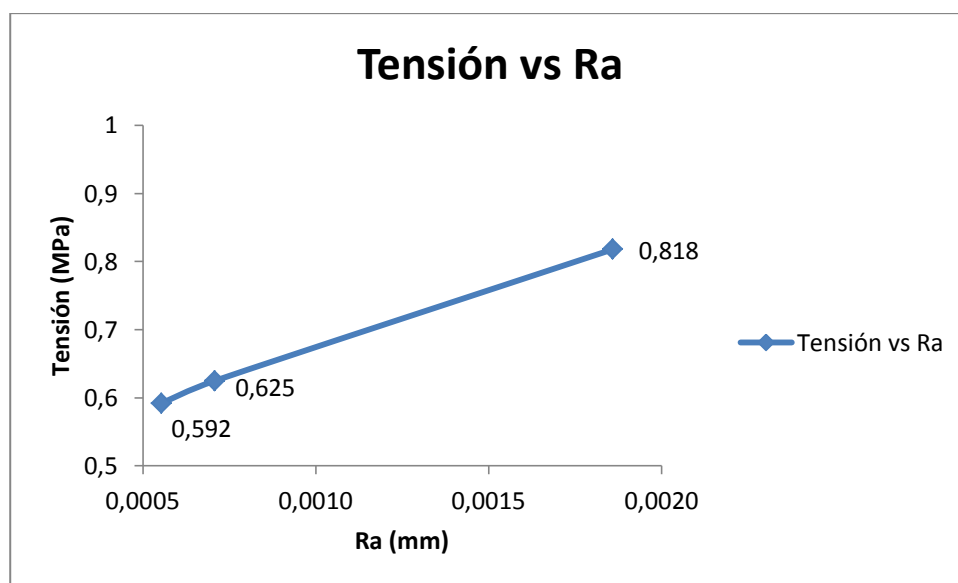


Figura 31. Gráfica Tensión –Ra

Como puede observarse en esta gráfica el valor de la adhesión aumenta progresivamente junto con el valor de  $R_a$ . Esto se debe a que cuanto mayor es el grano de la lija, mayor superficie rugosa hay después del lijado por lo que se necesita más tensión para el despegue.

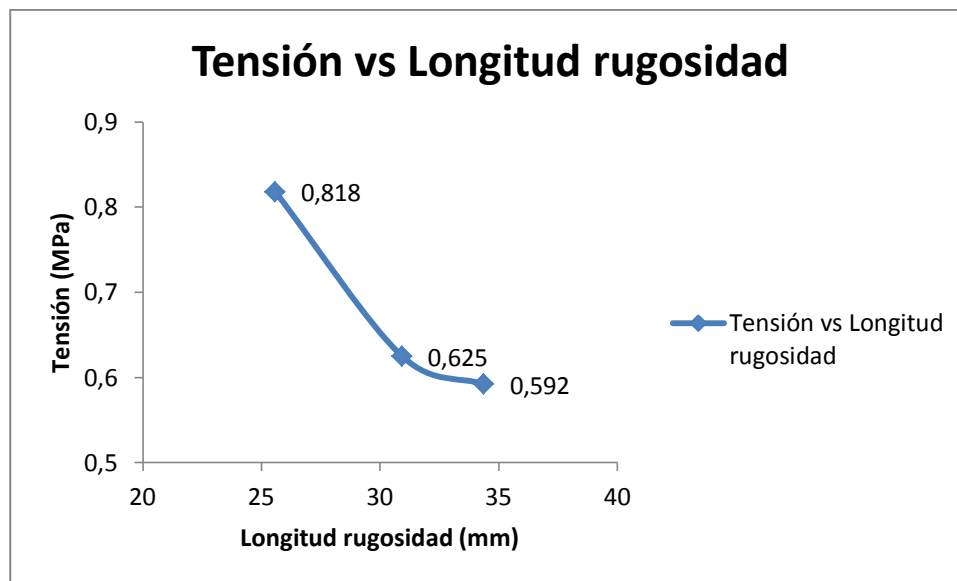


Figura 32. Gráfica Tensión - Longitud rugosidad

Podemos apreciar que cuanto mayor es el grano de lija (mayor grado de tensión) la longitud de rugosidad es menor. Esto es debido a que al tener un grano mayor el lijado la superficie queda más pulida por lo que la longitud de la rugosidad es menor.

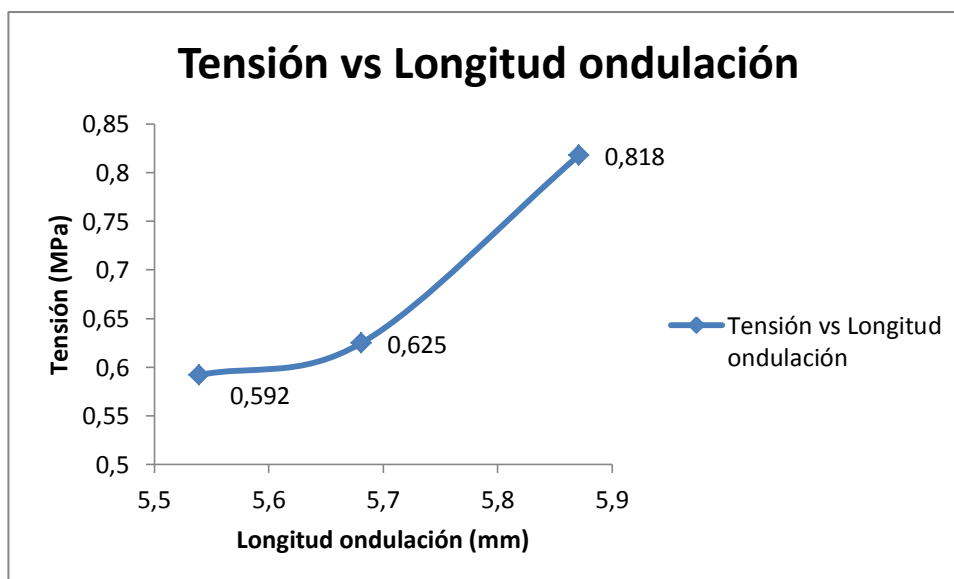
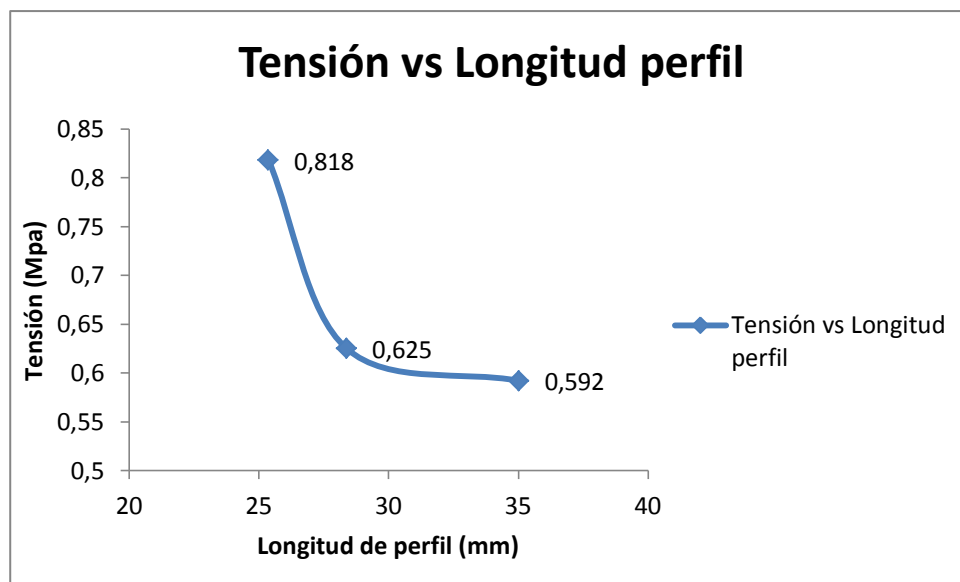


Figura 33. Gráfica Tensión - Longitud ondulación

Podemos ver como cuanto más longitud de ondulación hay mayor es la tensión necesaria.



*Figura 34. Gráfica Tensión – Longitud de perfil*

Podemos apreciar que cuanto mayor es el grano de lija (mayor grado de tensión) la longitud de perfil es menor. Esto es debido a que al tener un grano mayor el lijado la superficie queda más pulida por lo que la longitud del perfil es menor.

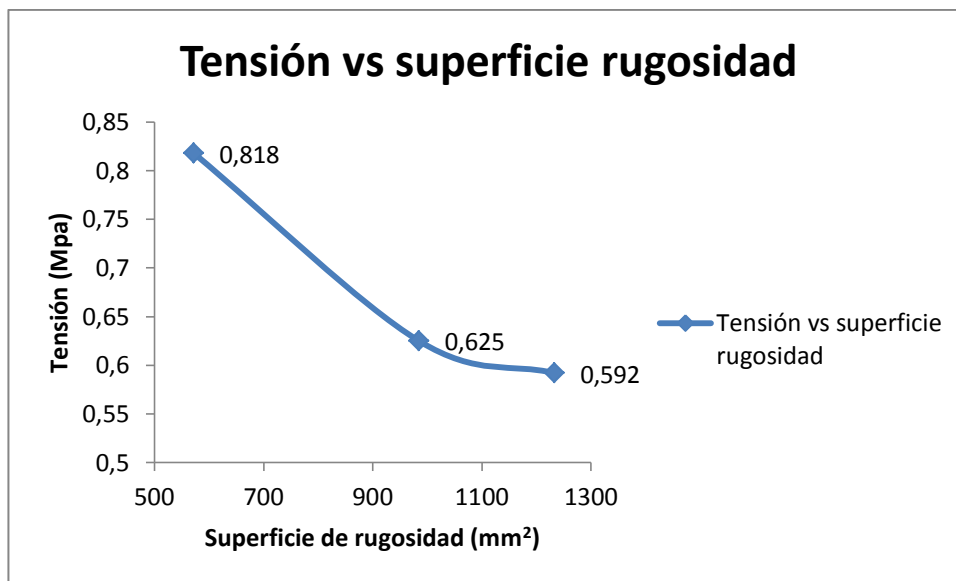


Figura 35. Gráfica Tensión – Superficie rugosidad

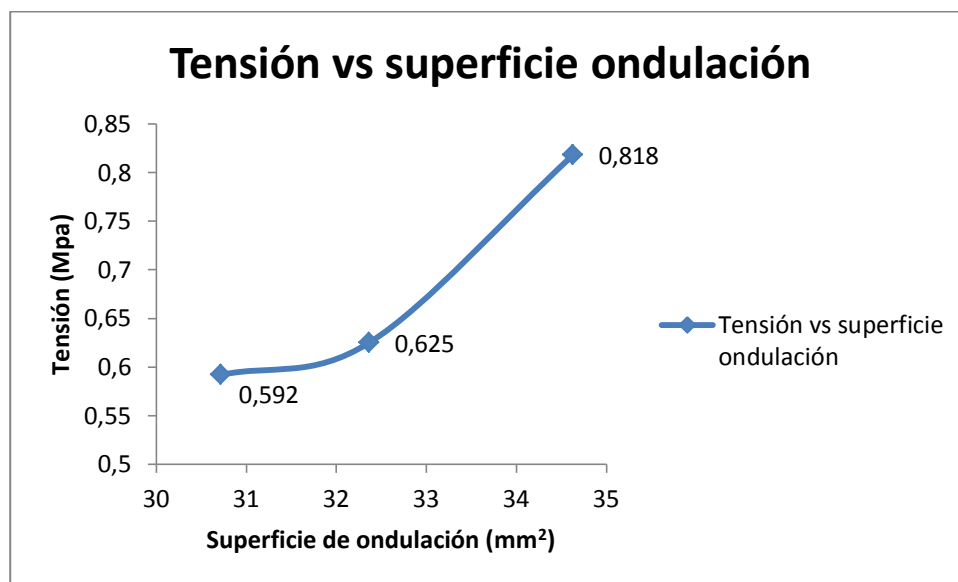


Figura 36. Gráfica Tensión – Superficie ondulación.

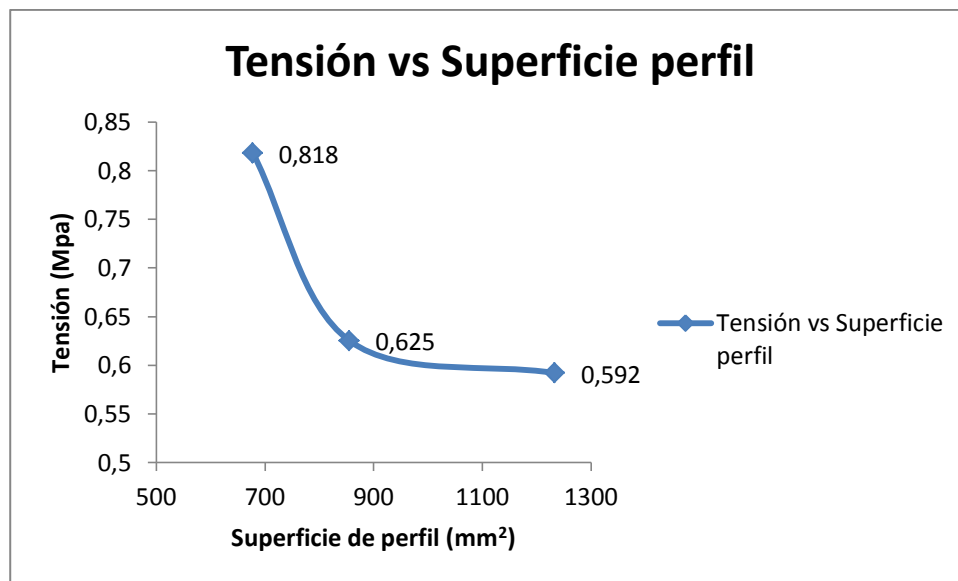


Figura 37. Gráfica Tensión – Superficie perfil

En estas tres gráficas se enfrentan los valores de la tensión de adhesión con las diferentes superficies de rugosidad, ondulación y perfil. Los patrones que siguen estas gráficas son debidos a las mismas razones que las descritas en las gráficas tensión-longitud debido a que las superficies están calculadas directamente a partir de las longitudes.

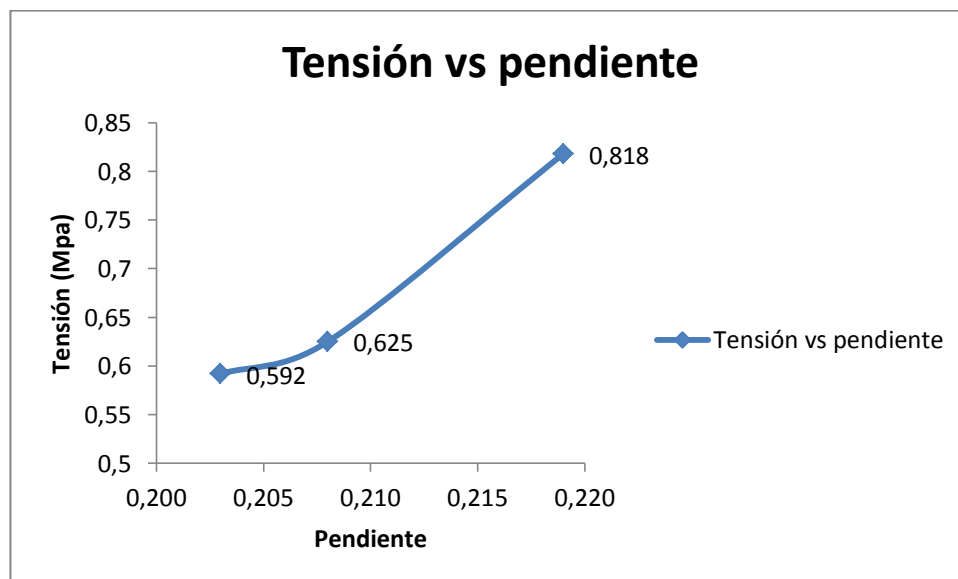
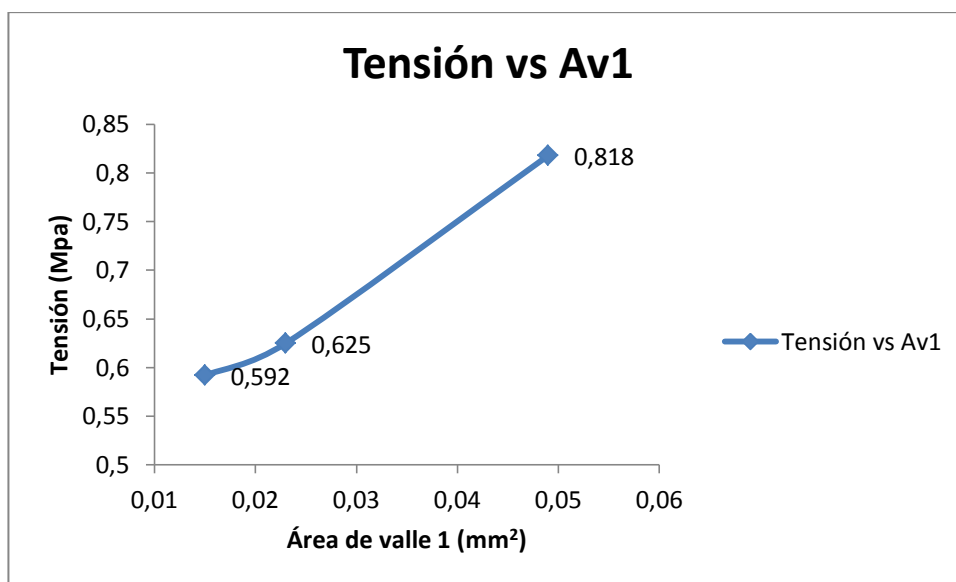


Figura 38. Gráfica Tensión – Pendiente

Como se puede comprobar en la figura la pendiente es otro parámetro del cual la tensión aumenta progresivamente al aumentar la pendiente.

### *Comparación Tensión adhesión – Área de valle 1 (Curva Abbott-Firestone)*



*Figura 39. Gráfica Tensión – Área de valle 1*

En esta gráfica se puede ver cómo el valor de tensión la AV1 aumenta progresivamente al aumentar la tensión. Sólo se va a analizar el valor del área de valle 1, no siendo necesaria el área de valle 2 que cumpliría el mismo criterio.

- *Comparación Adhesión – Área de pico 1 (Curva Abbott-Firestone)*

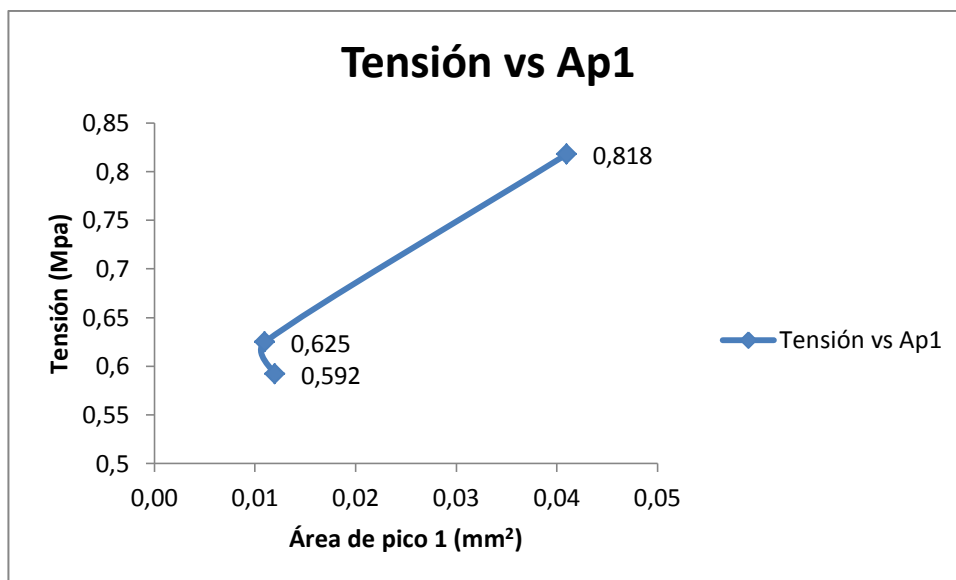


Figura 40. Gráfica Tensión – Área de valle 2

Para los valores de área de pico podemos apreciar que los dos primeros valores son muy similares produciéndose un pequeño descenso al aumentar el valor de tensión de adhesión. Para el último valor de tensión el área de pico crece de forma significativa. Los datos para el área de pico 2, al igual que en el caso del área de valle, siguen el mismo patrón que los del área de pico 1 por lo que no será necesario analizarlos.

A continuación se realizan los mismos cálculos pero esta vez comparando todos los valores frente a  $R_a$  en vez de la tensión de adhesión. Se hacen todas las representaciones gráficas anteriormente descritas.

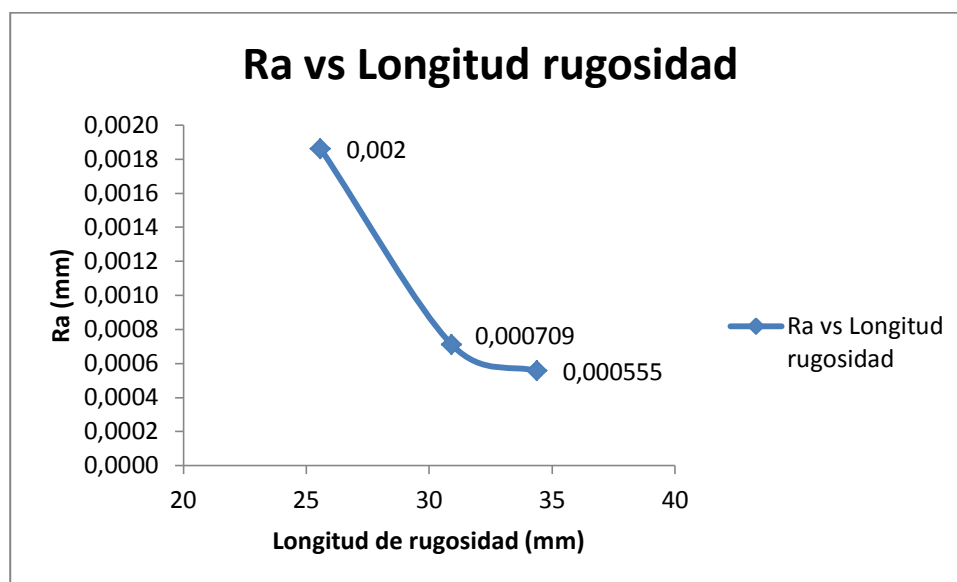


Figura 41. Gráfica  $R_a$ -Longitud rugosidad



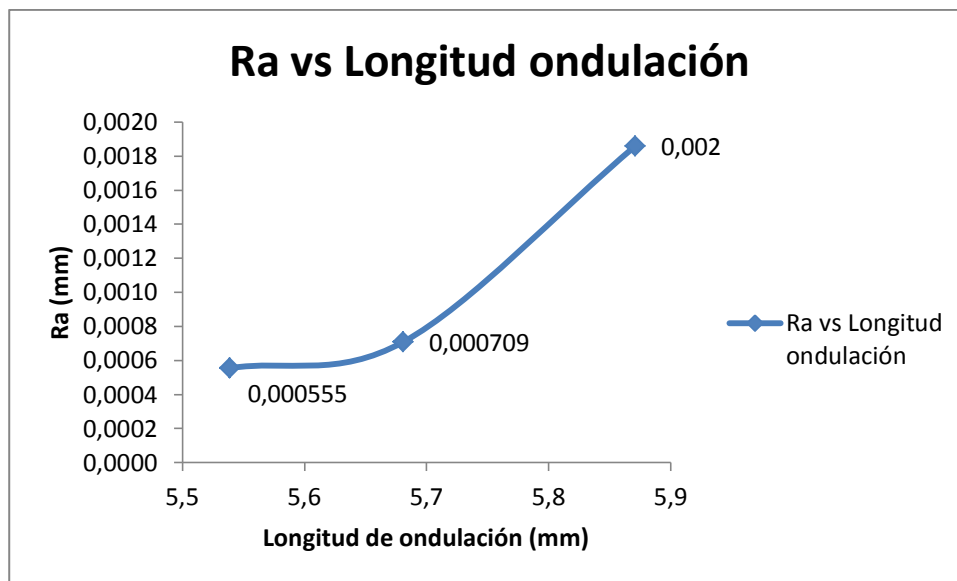


Figura 42. Gráfica Ra-Longitud ondulación

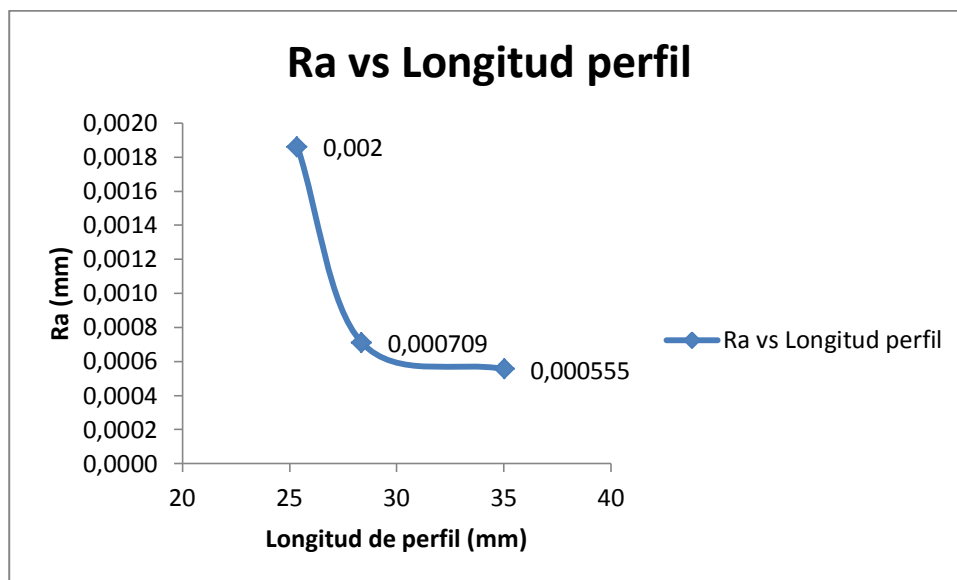


Figura 43. Gráfica Ra- Longitud perfil

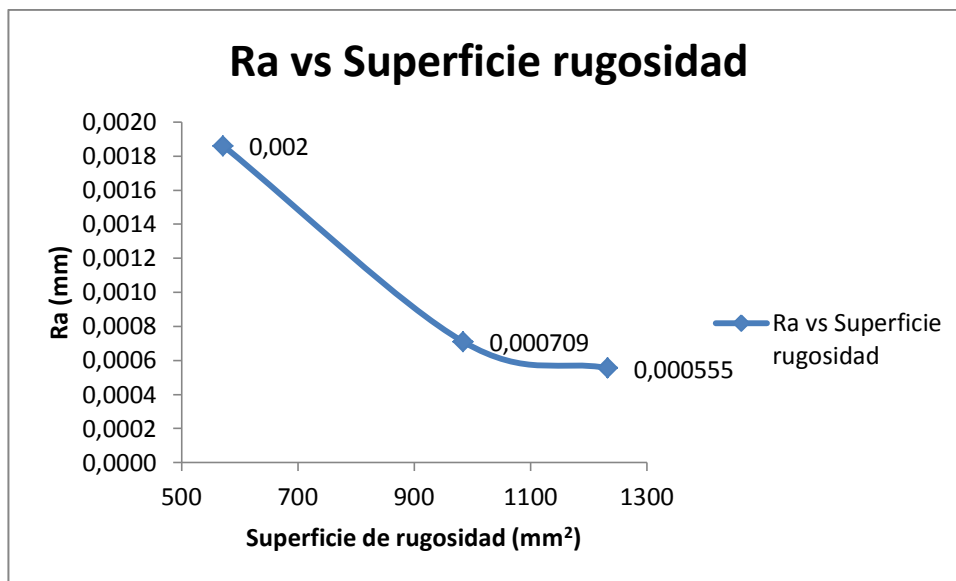


Figura 44. Gráfica Ra- Superficie rugosidad

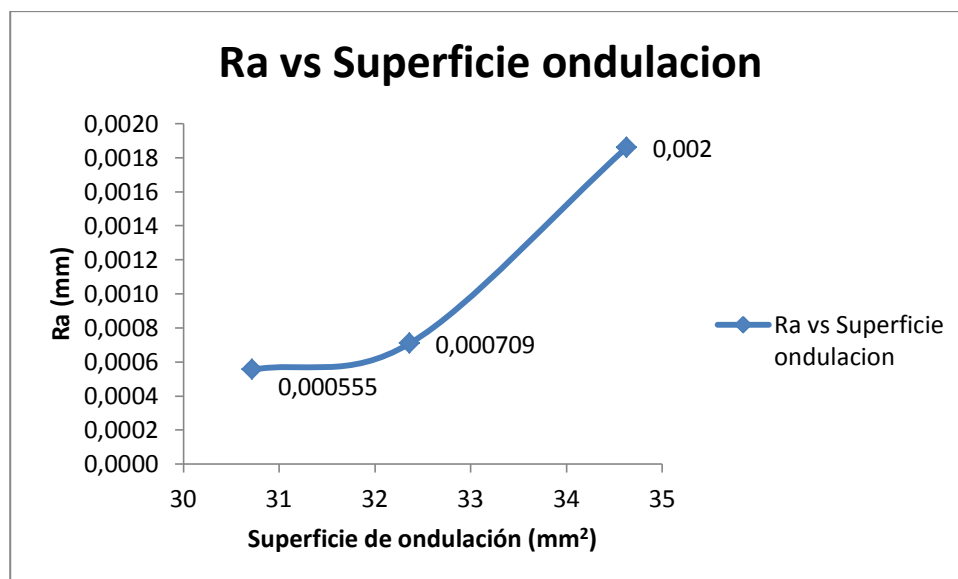


Figura 45. Gráfica Ra- Superficie ondulación

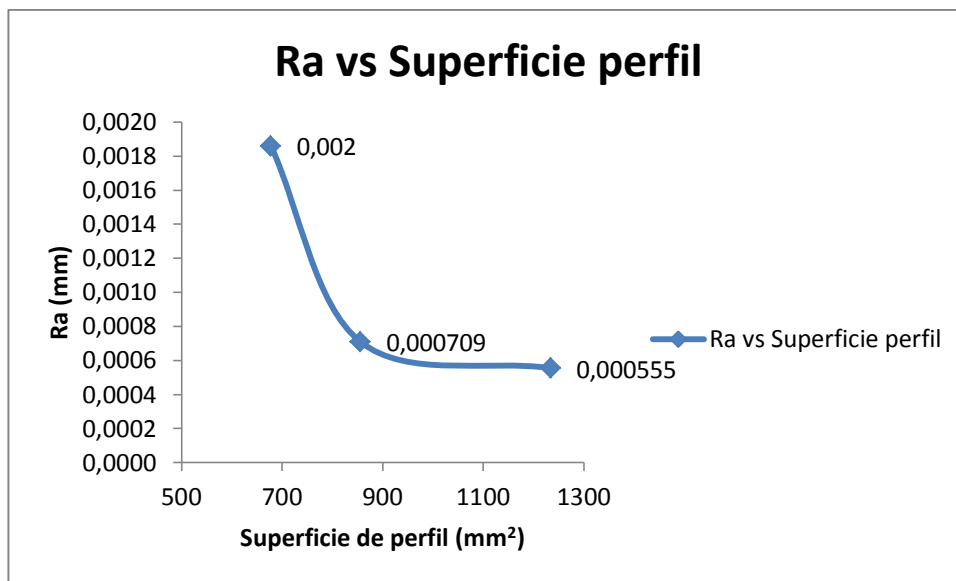


Figura 46. Gráfica Ra- Superficie perfil

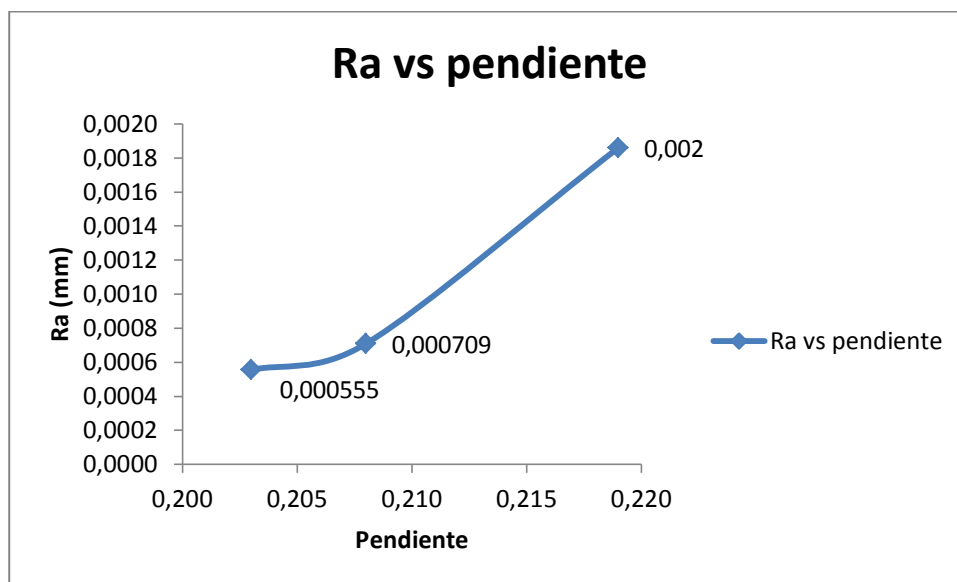


Figura 47. Gráfica Ra- pendiente

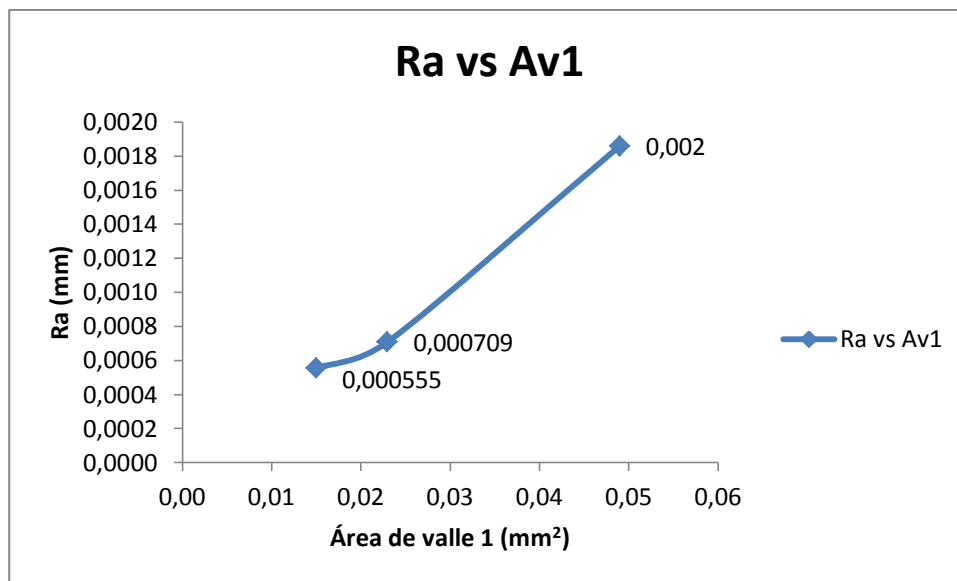


Figura 48. Gráfica Ra- Área de valle 1

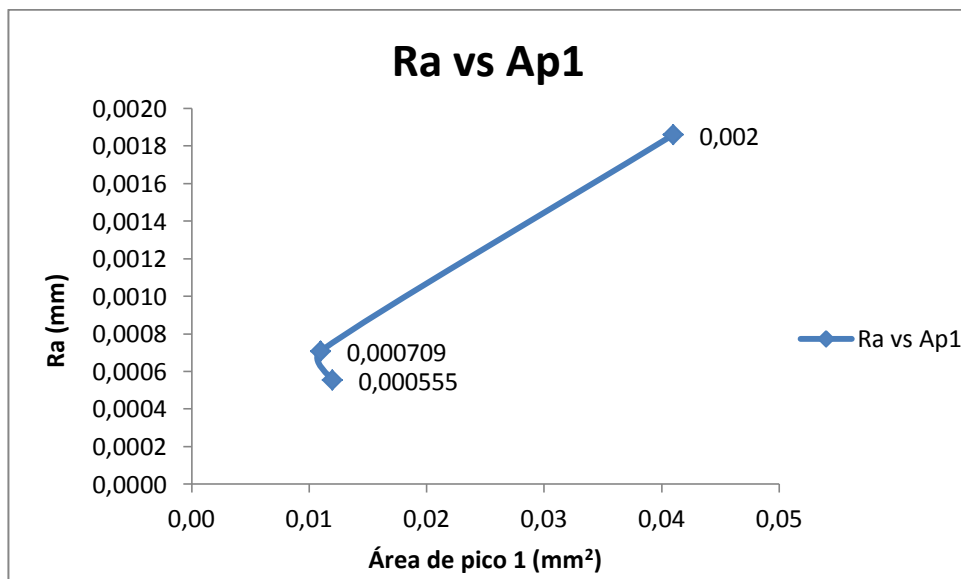


Figura 49. Gráfica Ra- Área de pico 1



## **8. Conclusiones**

Se van a explicar las diferentes conclusiones a las que se ha podido llegar después de este estudio.

- En lo referente a la tensión frente a Ra. La gráfica curva asciende de manera continuada hasta el valor del lijado PE.2. Cuanto mayor es la tensión, es decir cuanto mayor es el grano de lija con el que hemos lijado, mayor es el Ra. Con lo que se puede concluir que el valor de la tensión frente a Ra tiene un valor significativo en los tipos de probetas PE-1000, PE.LV y PE.2 dado que a medida que aumenta el lijado, aumenta la tensión de adhesión, llegando a su valor máximo en PE.2. Al lijar con un grano mayor la superficie del material presenta un Ra mayor puesto que la rugosidad es mayor. De esta forma podemos concluir que cuanto mayor es la rugosidad superficial mayor tensión se necesitará para romper la adhesión.
- Si se compara la tensión de adhesión frente a los valores de longitudes de rugosidad, podemos apreciar que cuanto mayor es la tensión menor es a longitud de rugosidad. Esto es debido a que cuanto más grueso es el grano de lija mayores son las crestas en la superficie del material, en cambio, al usar lijas con un grano más fino hay muchos más picos, de menor tamaño. La longitud de la curva en este último caso es mayor que cuando se usan lijas más gruesas y se demuestra en esta gráfica.
- En la gráfica que enfrenta la tensión frente a la longitud de ondulación se aprecia que a mayor longitud de ondulación mayor es la tensión que se necesita para romper la adhesión. La ondulación se define como las desviaciones de espaciamiento mucho mayor; ocurren debido a la deflexión del trabajo, vibraciones, tratamiento térmicas, y factores similares. Al no depender la ondulación del material tanto del lijado como la rugosidad se aprecia en los datos que los valores de ondulación son muy próximos.



- La gráfica tensión frente a longitud de perfil sigue el mismo patrón que la de rugosidad. El perfil es la rugosidad más la ondulación. Al ser los valores de rugosidad mucho mayores que los de ondulación la gráfica tensión-longitud de perfil sigue el mismo patrón que la de tensión frente a longitud de rugosidad.
- En la gráfica tensión-pendiente se aprecia como a mayor tensión mayor pendiente en la curva de Abbott-Firestone. La gráfica de Abbott-Firestone es una representación del porcentaje material-aire a las distintas profundidades del material. Una curva con mayor pendiente representa un material con más valles y crestas. Al usar una lija con un grano más grueso se producirán más de estos valles y crestas por lo que la pendiente es mayor en estos casos.
- En las gráficas de tensión de adhesión frente a los valores de área de valle 1 y área de pico 1 cuanto mayor son los valores de área de valle y de pico mayor es la tensión. Esto es explicado por la misma razón que en el punto anterior. Cuanto mayor es el grano de lija más valles y picos se producen. En la gráfica de área de pico podemos apreciar que el valor de área de pico para es menor para el segundo tipo de lija que para el primero. Esta pequeña variación en los valores es despreciable y se puede deber a pequeños fallos de medición o lijado en la zona de material elegida.
- Las gráficas de tensión frente a las superficies de rugosidad, ondulación y perfil siguen los mismos patrones que con las longitudes ya que se derivan de estas.



## **9. Líneas de trabajo futuras**

Se van a enumerar los estudios futuros que se podrían realizar para continuar con la investigación llevada a cabo en este proyecto y poder mejorar todos los resultados obtenidos.

- Sería necesario para aumentar la eficiencia de la tensión de adhesión un estudio del ángulo de contacto sobre el material utilizado.
- Se debería llevar a cabo un estudio enfocado al análisis de la energía superficial sobre este tipo de material dado que resultaría relevante para aumentar la tensión de adhesión.
- Sería útil medir la tensión de adhesión con otro aparato de medida con más precisión para comparar los resultados y poder disminuir el rango de error.

Las aplicaciones industriales que tiene este proyecto, una vez que se hayan añadido los estudios descritos anteriormente, es la posibilidad de que sirva para mejorar los adhesivos que se utilizan en aluminios ya que este material tiene como característica una mala adhesión.

Este tipo de estudios es necesario tanto en la industria del automóvil como en la industria aeronáutica, por ejemplo, donde se buscan materiales cada vez más ligeros, como es el caso del aluminio, y no siempre es posible realizar una unión mediante tornillos o remache y se busca una unión adhesiva que sea capaz de aguantar las distintas solicitaciones, antes mencionadas, a la vez que aligere el peso del aparato, lo cual conlleva a su vez a una disminución del combustible y un menor coste.

De la misma forma podría contribuir a la eliminación de procesos industriales costosos en cuanto a dinero y tiempo como por ejemplo la soldadura que supondría un gran ahorro para las empresas.



## **10. Bibliografía y referencias**

### **10.1. Bibliografía**

- Carlos Ferrer Giménez y Vicente Amigó Borrás (2004). Tecnología de materiales “Universidad Politécnica de Valencia”.
- Mario Madrid. Tecnología de la adhesión “Departamento técnico de Loctite en España”.
- E.P. Degarmo, R.A. Kohser, J.T. Black. (2003). Materiales y procesos de producción, “Editorial: Reverté”.
- Hufnagel, W. (1992). Manual del Aluminio. [Coca, Pedro] tr. (2ª edición edición). Barcelona: Editorial Reverté, S.A
- Universidad Carlos III Madrid (2010). Apuntes Tecnología Mecánica.
- D. Probst, P.H. Osanna (1998). The Abbott curve - well known in metrology but not on technical drawings, “Department for Interchangeable Manufacturing and Industrial Metrology Vienna University of Technology.
- G.P. Petropoulos, A.A. Torrance, C.N. Pandazaras, (2002). Abbott curves characteristics of turned surfaces, “Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Trinity College, Dublin”.
- William F. Smith (1998). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Madrid: Editorial Mc Graw Hill
- K.J. Kubiak, T.G. Mathia, M.C.T. (2009). Methodology for metrology of wettability versus roughness of engineering surfaces, “Wilson Institute of Engineering Thermofluids Surfaces and Interfaces, School of Mechanical Engineering - University of Leeds”.
- S. Derler, R. Huber, H.-P. Feuz, M. Hadad (2009). Influence of surface microstructure on the sliding friction of plantar skin against hard substrates “Elsevier B.V.”
- Acabados (2008). Referencia electrónica. Recuperado el 15 de abril del 2012 de [http://docs.google.com/Doc?id=dfschg6c\\_23gnpzfr2c](http://docs.google.com/Doc?id=dfschg6c_23gnpzfr2c).
- Norma UNE-EN-ISO 4287 (1997).





- Los adhesivos (2011). Historia de los adhesivos. Referencia electrónica. Recuperado el 23 Abril del 2013 de <http://www.losadhesivos.com/historia-de-los-adhesivos.html>.
- Mecánica. Referencia electrónica. Madrid, España. Recuperado el 30 de abril del 2009 de <http://www.mecanica.com.es/>
- Mayorga Palma, Jose Carlos. (n.d.). Acabados superficiales: Normas de acabado y simbología. Referencia electrónica. Recuperado el 25 de Marzo del 2013 de <http://www.monografias.com/trabajos70/acabados-superficiales-normas-simbologia/acabados-superficiales-normas-simbologia2.shtml>.
- Los adhesivos (2011). Teorías sobre la adhesión-modelos de adhesión. Referencia electrónica. Recuperado el 12 Abril del 2013 de <http://www.losadhesivos.com/teorias-adhesion.html>.

## **10.2. Referencias**

- R.A.E.
- <http://www.losadhesivos.com/historia-de-los-adhesivos.html>
- <http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/3.1%20Tipos%20de%20Superficie.pdf>
- <http://www.losadhesivos.com/teorias-adhesion.html>
- <http://148.234.34.12/misitio2/HinojosaRivera2001b.pdf>
- <http://www.monografias.com/trabajos70/acabados-superficiales-normas-simbologia/acabados-superficiales-normas-simbologia2.shtml>
- <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/46/19/Introduccion3.pdf> (17/04/2012).
- [http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA\\_COMPLEMENTARIA/MATERIALES/acabados.pdf](http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/MATERIALES/acabados.pdf)

